



**TUGAS AKHIR - TL 141584**

**ANALISA PENGARUH DESAIN GRITCONE TERHADAP  
POLA PATAHAN GRITCONE PADA VERTICAL ROLLER  
MILL DENGAN SIMULASI EXPLICIT DYNAMIC (LS-DYNA)**

**ANDIKA RIZALDY  
NRP 2712 100 083**

Dosen Pembimbing  
Mas Irfan P. Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D  
Ir Rochman Rochiem, MSc

JURUSAN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya  
2017

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*



**FINAL PROJECT - TL 141584**

**ANALYSIS THE EFFECT OF DESIGN TO GRITCONE  
FRACTURE AT VERTICAL ROLLER MILL USING  
EXPLICIT DYNAMIC SIMULATION (LS-DYNA)**

**ANDIKA RIZALDY  
NRP 2712 100 083**

Advisors

Mas Irfan P. Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D

Ir Rochman Rochiem, MSc.

**MATERIALS AND METALLURGICAL ENGINEERING DEPARTMENT  
Faculty of Industrial Technology  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya  
2017**

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

**ANALISA PENGARUH DESAIN GRITCONE TERHADAP  
POLA PATAHAN GRITCONE PADA VERTICAL  
ROLLER MILL DENGAN SIMULASI EXPLICIT  
DYNAMIC (LS-DYNA)**

**TUGAS AKHIR**

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
Pada

Bidang Studi Metalurgi Manufaktur  
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Material dan Metalurgi  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

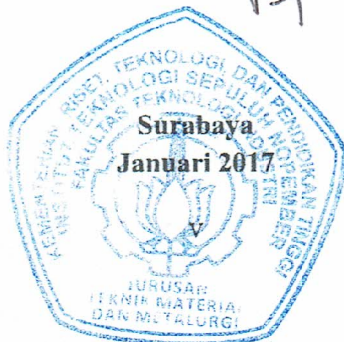
Oleh :

**ANDIKA RIZALDY**

NRP. 2712100083

Disetujui oleh Dosen Pembimbing Tugas Akhir :

1. Mas Irfan P. Hidayat, ST. M.Sc, Ph.D ..... (Pembimbing 1)
2. Ir. Rochman Rochiem, M.Sc ..... (Pembimbing 2)



# **ANALISA PENGARUH DESAIN GRITCONE TERHADAP POLA PATAHAN GRITCONE PADA VERTICAL ROLLER MILL DENGAN SIMULASI EXPLICIT DYNAMIC (LS-DYNA)**

**Nama** : Andika Rizaldy  
**NRP** : 2712100083  
**Jurusan** : Teknik Material & Metalurgi  
**Dosen Pembimbing** : Mas Irfan P.H., S.T., M.Sc., Ph.D.  
Ir. Rochman Rochiem, M.Sc.

## **Abstrak**

Polysius Vertical Roller Mill adalah coal mill yang digunakan PT Holcim Indonesia untuk menggiling batubara bituminous untuk bahan bakar rotary kiln. Dalam pengoperasiannya, salah satu komponen dari Vertical Roller Mill mengalami kegagalan aus yaitu gritcone. Penelitian ini dilakukan untuk menganalisa persebaran ketebalan dari komponen gritcone dengan disimulasikan secara dinamis eksplisit dan berdasarkan kondisi operasional. Ketebalan dinding dipetakan karena permukaan yang terkena abrasi terdapat patahan mikro di permukaannya. Penelitian dilakukan dengan variasi ketebalan 0.01 m, dan 0.02 m serta variasi desain gritcone dengan radius bawah sebesar 0.165 m, 0.215 m, 0.265 m, 0.315 m, dan 0.365 m. Hasil penelitian menunjukkan pengurangan ketebalan paling besar terjadi pada desain gritcone dengan radius 0.165 m dengan ketebalan 0.01 m dan 0.02 m, dengan pengurangan sebesar  $1.423 \times 10^{-5}$  m dan  $2.45 \times 10^{-5}$  m.

***Kata Kunci:*** Analisa dinamis eksplisit, Vertical Roller Mill, aus, ketebalan, gritcone.

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

**ANALYSIS THE EFFECT OF DESIGN TO GRITCONE  
FRACTURE AT VERTICAL ROLLER MILL USING  
EXPLICIT DYNAMIC SIMULATION (LS-DYNA)**

**Name** : Andika Rizaldy  
**SRN** : 2712100083  
**Major** : Material and Metallurgical Engineering Dept  
**Advisor** : Mas Irfan P.H., S.T., M.Sc., Ph.D.  
**Lectures** : Ir. Rochman Rochiem, M.Sc.

***Abstract***

*Polysius Vertical Roller Mill is a coal mill used to grind PT Holcim Indonesia bituminous coal to fuel the rotary kiln. In operation, one of the components of Vertical Roller Mill suffer wear failure, which is gritcone. This study was conducted to analyze the thickness distribution of the component using explicit dynamic simulation and based on operational conditions. The wall thickness of the exposed surface is mapped as a microcrack is constructed due to abrasion on the surface. The study was conducted with thickness variation of 0.01 m and 0.02 m as well as design variations gritcone the bottom radius of 0.165 m, 0.215 m, 0.265 m, 0.315 m and 0.365 m. The results showed the greatest reduction in thickness occur in the design gritcone with a radius of 0.165 m with a thickness of 0.01 m and 0.02 m, with a reduction of  $1.423 \times 10^{-5}$  m and  $2.45 \times 10^{-5}$  m.*

***Keywords:*** *Explicit Dynamic Analysis, Vertical Roller Mill, wear, thickness, gritcone.*



*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## KATA PENGANTAR

Puji Syukur penulis ucapkan kehadirat Allah SWT, sehingga dapat menyelesaikan laporan Tugas Akhir dengan judul : **“ANALISA PENGARUH DESAIN GRITCONE TERHADAP POLA PATAHAN GRITCONE PADA VERTICAL ROLLER MILL DENGAN SIMULASI EXPLICIT DYNAMICs (LS-DYNA)”**. Adapun laporan ini disusun dan diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan studi di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI – Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), Surabaya.

Dalam penyusunan tugas akhir ini, penulis menyadari masih adanya keterbatasan dan kekurangan di dalam penyusunan laporan ini. Besar harapan penulis akan saran, dan kritik yang membangun. Hal ini dikarenakan adanya keterbatasan kemampuan penulis dalam penyusunan laporan ini. Namun, penulis dapat mewujudkan laporan ini secara lengkap berkat adanya perhatian, bimbingan, dan petunjuk dari berbagai pihak.

Demikian penulis berharap semoga laporan ini dapat memberikan manfaat yang sebesar-besarnya khususnya bagi sesama mahasiswa yang menggeluti bidang pemodelan.

Surabaya, Januari 2017  
Penulis

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## DAFTAR ISI

<b>LEMBAR JUDUL .....</b>	<b>i</b>
<b>TITLE.....</b>	<b>iii</b>
<b>LEMBAR PENGESAHAN.....</b>	<b>v</b>
<b>ABSTRAK.....</b>	<b>vii</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>ix</b>
<b>KATA PENGANTAR .....</b>	<b>xi</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>xiii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR .....</b>	<b>xv</b>
<b>DAFTAR TABEL.....</b>	<b>xix</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN</b>	
1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Rumusan Permasalahan.....	2
1.3. Batasan Masalah.....	2
1.4. Tujuan .....	3
1.5. Manfaat .....	3
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b>	
2.1. Penelitian Selanjutnya.....	5
2.2. <i>Grinding Mill</i> . ....	6
2.3. <i>Vertical Roller Mill</i> . ....	7
2.4. Analisa Kegagalan.....	8
2.5. Teori <i>Wear</i> . ....	10
2.6. <i>Wear</i> disebabkan oleh Partikel Solid. ....	12
2.7. <i>Impact-abrasive wear</i> .....	13
2.8. Analisa <i>Explicit Dynamic</i> .....	14
2.9. Elemen <i>Solid Shell</i> . ....	15
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN</b>	
3.1. Diagram Alir Penelitian .....	21
3.2. Materi Penelitian .....	22
3.2.1. <i>Vertical Roller Mill</i> .....	22
3.2.2. Batubara Bituminous.....	24
3.2.3. Peralatan Penelitian.....	25
3.3. Pemodelan dengan ANSYS 17.1 .....	25

3.3.1. Pemodelan <i>Gritcone Vertical Roller Mill</i> .....	27
3.3.2. Parameter Penelitian .....	27
3.3.3. <i>Meshing</i> .....	27
3.4. Rancangan Penelitian .....	28
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN</b>	
4.1. <i>Gritcone</i> dengan Ketebalan 0.01 m .....	32
4.1.1. Pengaruh Geometri <i>Gritcone</i> dengan $r = 0.165$ m .	32
4.1.2. Pengaruh Geometri <i>Gritcone</i> dengan $r = 0.215$ m .	35
4.1.3. Pengaruh Geometri <i>Gritcone</i> dengan $r = 0.265$ m .	38
4.1.4. Pengaruh Geometri <i>Gritcone</i> dengan $r = 0.315$ m .	41
4.1.5. Pengaruh Geometri <i>Gritcone</i> dengan $r = 0.365$ m .	44
4.2. <i>Gritcone</i> dengan Ketebalan 0.02 m .....	47
4.2.1. Pengaruh Geometri <i>Gritcone</i> dengan $r = 0.165$ m .	48
4.2.2. Pengaruh Geometri <i>Gritcone</i> dengan $r = 0.215$ m .	50
4.2.3. Pengaruh Geometri <i>Gritcone</i> dengan $r = 0.265$ m .	53
4.2.4. Pengaruh Geometri <i>Gritcone</i> dengan $r = 0.315$ m .	56
4.2.5. Pengaruh Geometri <i>Gritcone</i> dengan $r = 0.365$ m .	59
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN</b>	
5.1. Kesimpulan .....	63
5.2. Saran.....	64
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....	xxi
<b>LAMPIRAN</b> .....	xxiii
<b>UCAPAN TERIMA KASIH</b> .....	xxvii
<b>BIODATA PENULIS</b> .....	xxix

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1</b> Mekanisme pemecahan partikel: (a) impact atau kompresi, (b) chipping, (c) abrasi. (Wills, 1988).....	6
<b>Gambar 2.2</b> Polysius <i>vertical roller mill</i> (PT Holcim Indonesia) .....	7
<b>Gambar 2.3</b> Kesetimbangan gaya pada partikel yang bersinggungan dengan permukaan. ....	12
<b>Gambar 2.4</b> Abrasi impak dengan dua benda kerja dan tiga benda kerja (Ratia, 2015) .....	14
<b>Gambar 2.5</b> <i>eight node solid shell element</i> .....	16
<b>Gambar 2.6</b> Konstruksi permukaan acuan elemen shell solid .....	18
<b>Gambar 3.1</b> Diagram alir penelitian.....	21
<b>Gambar 3.2</b> Gambar 2D Polysius <i>vertical roller mill</i> .....	22
<b>Gambar 3.3</b> Gambar 2D <i>grit cone</i> (PT Holcim Indonesia) .....	23
<b>Gambar 3.4</b> Diagram alir pemodelan menggunakan software ANSYS.....	26
<b>Gambar 3.5</b> Hasil meshing <i>gritcone vertical roller mill</i> desain awal .....	28
<b>Gambar 4.1</b> Geometri Gritcone dengan Radius Bawah $r = 0.165$ m.....	33
<b>Gambar 4.2</b> Distribusi Ketebalan pada Dinding <i>Gritcone</i> dengan Radius Bawah $r = 0.165$ m .....	33
<b>Gambar 4.3</b> Grafik <i>time vs shell thickness gritcone case 1</i> .....	34
<b>Gambar 4.4</b> Distribusi tegangan Von Mises pada Dinding <i>Gritcone</i> dengan Radius Bawah $r = 0.165$ m .....	35
<b>Gambar 4.5</b> Geometri <i>Gritcone</i> dengan Radius Bawah $r = 0.215$ m.....	36
<b>Gambar 4.6</b> Distribusi Ketebalan pada Dinding <i>Gritcone</i> dengan Radius Bawah $r = 0.215$ m .....	36
<b>Gambar 4.7</b> Grafik <i>time vs shell thickness gritcone case 2</i> .....	37

<b>Gambar 4.8</b> Distribusi tegangan Von Mises pada Dinding <i>Gritcone</i> dengan Radius Bawah $r = 0.215$ m .....	38
<b>Gambar 4.9</b> Geometri <i>Gritcone</i> dengan Radius Bawah $r =$ $0.265$ m .....	39
<b>Gambar 4.10</b> Distribusi Ketebalan pada Dinding <i>Gritcone</i> dengan Radius Bawah $r = 0.265$ m. ....	39
<b>Gambar 4.11</b> Grafik <i>time vs shell thickness Gritcone case 3</i> ..	40
<b>Gambar 4.12</b> Distribusi tegangan Von Mises pada Dinding <i>Gritcone</i> dengan Radius Bawah $r = 0.265$ m .....	41
<b>Gambar 4.13</b> Geometri <i>Gritcone</i> dengan Radius Bawah $r =$ $0.315$ m .....	42
<b>Gambar 4.14</b> Distribusi Ketebalan pada Dinding <i>Gritcone</i> dengan Radius Bawah $r = 0.315$ m. ....	42
<b>Gambar 4.15</b> Grafik <i>time vs shell thickness gritcone case 4</i> ..	43
<b>Gambar 4.16</b> Distribusi tegangan Von Mises pada Dinding <i>Gritcone</i> dengan Radius Bawah $r = 0.315$ m .....	44
<b>Gambar 4.17</b> Geometri <i>Gritcone</i> dengan Radius Bawah $r =$ $0.365$ m .....	45
<b>Gambar 4.18</b> Distribusi Ketebalan pada Dinding <i>Gritcone</i> dengan Radius Bawah $r = 0.365$ m .....	45
<b>Gambar 4.19</b> Grafik <i>time vs shell thickness gritcone case 5</i> ..	46
<b>Gambar 4.20</b> Distribusi tegangan Von Mises pada Dinding <i>Gritcone</i> dengan Radius Bawah $r = 0.365$ m .....	47
<b>Gambar 4.21</b> Geometri <i>Gritcone</i> dengan Radius Bawah $r =$ $0.165$ m .....	48
<b>Gambar 4.22</b> Distribusi Ketebalan pada Dinding <i>Gritcone</i> dengan Radius Bawah $r = 0.165$ m .....	48
<b>Gambar 4.23</b> Grafik <i>time vs shell thickness gritcone case 6</i> ..	49
<b>Gambar 4.24</b> Distribusi tegangan Von Mises pada Dinding <i>Gritcone</i> dengan Radius Bawah $r = 0.165$ m .....	50
<b>Gambar 4.25</b> Geometri <i>Gritcone</i> dengan Radius Bawah $r =$ $0.215$ m .....	51
<b>Gambar 4.26</b> Distribusi Ketebalan pada Dinding <i>Gritcone</i> dengan Radius Bawah $r = 0.215$ m .....	51
<b>Gambar 4.27</b> Grafik <i>time vs shell thickness gritcone case 7</i> ..	52

<b>Gambar 4.28</b> Distribusi tegangan Von Mises pada Dinding <i>Gritcone</i> dengan Radius Bawah $r = 0.215$ m .....	53
<b>Gambar 4.29</b> Geometri <i>Gritcone</i> dengan Radius Bawah $r =$ $0.265$ m.....	54
<b>Gambar 4.30</b> Distribusi Ketebalan pada Dinding <i>Gritcone</i> dengan Radius Bawah $r = 0.265$ m. ....	54
<b>Gambar 4.31</b> Grafik <i>time vs shell thickness Gritcone case 8</i> ..	55
<b>Gambar 4.32</b> Distribusi tegangan Von Mises pada Dinding <i>Gritcone</i> dengan Radius Bawah $r = 0.265$ m .....	56
<b>Gambar 4.33</b> Geometri <i>Gritcone</i> dengan Radius Bawah $r =$ $0.315$ m.....	57
<b>Gambar 4.34</b> Distribusi Ketebalan pada Dinding <i>Gritcone</i> dengan Radius Bawah $r = 0.315$ m. ....	57
<b>Gambar 4.35</b> Grafik <i>time vs shell thickness gritcone case 9</i> ...	58
<b>Gambar 4.36</b> Distribusi tegangan Von Mises pada Dinding <i>Gritcone</i> dengan Radius Bawah $r = 0.315$ m .....	59
<b>Gambar 4.37</b> Geometri <i>Gritcone</i> dengan Radius Bawah $r =$ $0.365$ m.....	60
<b>Gambar 4.38</b> Distribusi Ketebalan pada Dinding <i>Gritcone</i> dengan Radius Bawah $r = 0.365$ m .....	60
<b>Gambar 4.39</b> Grafik <i>time vs shell thickness gritcone case 10</i> ..	61
<b>Gambar 4.40</b> Distribusi tegangan Von Mises pada Dinding <i>Gritcone</i> dengan Radius Bawah $r = 0.365$ m .....	62



*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2.1</b> Permasalahan dalam kegagalan komponen mesin (Brook & Choudury, 2002) .....	8
<b>Tabel 2.2</b> Kasus kegagalan material akibat perawatan komponen mesin (Brook & Choudury, 2002).....	9
<b>Tabel 2.3</b> Kasus kegagalan material akibat kondisi kerja yang ekstrim (Brook & Choudury, 2002).....	10
<b>Tabel 3.1</b> Komposisi Kimia Thyssenkrupp XAR® 400 (Thyssenkrupp, 2014).....	24
<b>Tabel 3.2</b> Sifat Mekanik Thyssenkrupp XAR® 400 (Thyssenkrupp, 2014).....	24
<b>Tabel 3.3</b> Komposisi kimia batubara Bituminous.....	25
<b>Tabel 3.4</b> Parameter Penelitian .....	27
<b>Tabel 3.5</b> Tabel Rancangan Penelitian.....	29
<b>Tabel 3.6</b> Tabel Timeline Penelitian.....	29
<b>Tabel 4.1</b> Kondisi Simulasi Kegagalan.....	31
<b>Tabel 4.2</b> Hasil Simulasi Kegagalan.....	32

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## **BAB I**

### **PENDAHULUAN**

#### **1.1 Latar Belakang**

PT Holcim Indonesia Tbk. merupakan salah satu perusahaan yang bergerak di bidang material bangunan dengan salah satu produknya yaitu semen. PT Holcim Indonesia Tbk. mempunyai 4 plant yang tersebar di wilayah Indonesia. Plant tersebut berada di Lhoknga – Aceh, Narogong – Jawa Barat, Cilacap – Jawa Tengah, dan Tuban – Jawa Timur. Keempat plant ini memproduksi total sekitar 15 juta ton semen per tahun. Kegiatan produksi PT Holcim Indonesia ditunjang dengan fasilitas penggilingan semen dan terminal distribusi hingga ke Sumatra dan Kalimantan.

PT Holcim Indonesia – Tuban Plant memproduksi semen dalam 3 tahapan yaitu *raw material extraction*, *blending and clinkerisation*, dan *grinding and distribution*. *Raw material extraction* adalah proses dimana limestone dan tanah liat diekstraksi menggunakan metode *drilling* dan *blasting*. Pada tahap *blending and clinkerisation*, bahan mentah diproses dalam *rotary kiln* yang beroperasi menggunakan batu bara sebagai bahan bakarnya. Batu bara yang akan menjadi bahan bakar untuk *kiln* diproses dengan menggunakan *vertical roller mill*. PT Holcim Indonesia Tuban Plant mempunyai 2 *vertical roller mill* yang terletak di Plant Tuban 1 dan Plant Tuban 2. Pada alat *vertical roller mill* terjadi kegagalan berupa patahan yang terjadi di komponen *grit cone*. Melihat terjadi kegagalan yang berulang pada komponen *grit cone* maka dibutuhkan evaluasi pada desain *grit cone* agar kerusakan dapat diatasi dan dicegah di kemudian hari.

Guna mendapatkan hasil penelitian yang baik untuk mengetahui efektifitas pada desain lama maupun baru, dapat dilakukan pemodelan distribusi tegangan pada *grit cone* tersebut. Beberapa dekade belakangan ini, telah banyak dilakukan eksperimen dan pemodelan dengan menggunakan konsep *Explicit Dynamic (LS-Dyna)* yang bertujuan untuk mengamati interaksi antara partikel coal dengan permukaan *grit cone* dan distribusi



tegangan pada komponen gritcone. Metode pemodelan secara numerik ini banyak dilakukan karena dapat menjadi bahan evaluasi yang efektif dan efisien dalam penelitian.

Salah satu software yang menggunakan prinsip metode elemen hingga adalah ANSYS. Penggunaan simulasi dengan software ANSYS dilakukan karena lebih efisien waktu dan harga (Tayade, 2015). Dalam penelitian ini akan dilakukan analisis distribusi tegangan pada desain lama dan desain baru *grit cone vertical roller mill* dengan menggunakan software ANSYS/Mechanical APDL Ver 17.1 untuk memperoleh desain yang paling optimal

## 1.2 Perumusan Masalah

Permasalahan yang dibahas dalam penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana distribusi ketebalan dinding *gritcone vertical roller mill* mengalami kegagalan?
2. Bagaimana alternatif geometri *gritcone vertical roller mill* yang optimal untuk mencegah kegagalan?

## 1.3 Batasan Masalah

Beberapa batasan masalah dan asumsi yang digunakan agar penelitian dapat berjalan dengan baik adalah :

1. Komponen *grit cone vertical roller mill* mempunyai komposisi material dan sifat mekanik yang homogen.
2. Kondisi operasi *vertical roller mill* diasumsikan berjalan sesuai dengan standar
3. Posisi pemasangan *grit cone vertical roller mill* diasumsikan sudah sesuai prosedur

## 1.4 Tujuan

Adapun tujuan yang dilaksanakan pada penelitian ini adalah:

1. Menganalisis distribusi ketebalan dinding *gritcone vertical roller mill* yang mengalami kegagalan



- 
2. Mendapatkan alternative geometri *grit cone vertical roller mill* yang optimal untuk mencegah kegagalan

### 1.5 Manfaat

Manfaat yang didapat dari penelitian ini adalah didapatkannya informasi mengenai distribusi ketebalan dinding *gritcone* dari desain lama maupun baru pada *gritcone vertical roller mill*. Hal ini diharapkan dapat menjadi referensi penanggulangan kegagalan dan pencegahan terjadinya kembali kegagalan yang sama pada komponen *gritcone vertical roller mill* dikemudian hari dan menjadi dasar pengembangan pada ilmu berikutnya.



*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Penelitian Sebelumnya**

Root Cause Analysis atau analisa akar permasalahan bertujuan untuk mengetahui penyebab terjadinya kerusakan yang terjadi pada komponen dan instalasi pabrik serta untuk menentukan tindakan penanggulangan dan pencegahan agar kerusakan tidak terulang. Manfaat dari analisis akar permasalahan kegagalan ini dalam jangka pendek diharapkan dapat mengoptimalkan desain, proses, dan metode fabrikasi peralatan. Untuk jangka panjang digunakan dalam rangka pengembangan material dan metode pengoperasian, untuk evaluasi dan memperkirakan performa material, serta untuk memperbaiki sistem pemeliharaan karena hal ini sangat penting dan sangat berguna pada dunia industri, sehingga banyak peneliti yang melakukan penelitian pada bidang ini.

Deniz Altun dkk. (2016) melakukan penelitian mengenai sistem control parameter operasional pada *vertical roller mill* dikarenakan adanya penurunan performa dari *vertical roller mill* disebabkan beberapa kegagalan, diantaranya menurunnya fungsi *classifier* dan adanya kerusakan aus pada komponen *vertical roller mill*.

Muhammad Yasin Naz dkk. (2016) melakukan penelitian mengenai pengaruh dari sudut impak dan kecepatan partikel yang mengerosi pada permukaan baja karbon sedang. Penelitian ini dilakukan dengan proses *sand blasting* dengan menggunakan partikel pasir yang ditembakkan pada permukaan baja karbon sedang dengan beberapa variasi sudut dan kecepatan. Didapatkan hasil bahwa dengan bertambahnya sudut impak pada saat partikel ditembakkan dan bertambahnya kecepatan partikel mengakibatkan meningkatnya laju erosi pada permukaan baja.

Emmanuel Rigaud dan Alain le Bot (2013) melakukan penelitian mengenai pengaruh sudut kontak pada keausan yang disebabkan *sliding impact*. Penelitian ini dilakukan dengan menganalisa aus yang disebabkan *sliding impact* rendah pada



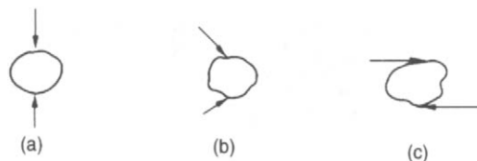


stainless steel dan baja tahan karat. *Sliding impact* rendah adalah tegangan normal dimana tekanan pada kontak memiliki nilai dibawah kekuatan luluh dari material. Dari penelitian ini didapatkan hasil yang menunjukkan bahwa keausan tidak terjadi pada sudut kontak rendah, maksimal pada sudut kontak  $60^\circ$  dan menurun ketika sudut kontak melebihi  $70^\circ$ .

Karena kurangnya penelitian mengenai komponen *gritcone*, penulis mengangkat topik abrasi pada komponen *gritcone* yang terdapat pada *vertical roller mill* dengan menggunakan simulasi eksplisit dinamis.

## 2.2 Grinding Mill

*Grinding* atau penggerusan adalah proses dimana dilakukan pengurangan ukuran partikel dengan menggunakan kombinasi antara impact dengan abrasi. Proses *grinding* bisa dilakukan dalam keadaan kering atau dengan air sebagai suspensi. *Grinding* dilakukan di dalam bejana silinder baja yang berputar. Di dalam silinder baja terdapat ruang berisi media penggerus yang bebas bergerak sehingga menggerus partikel dan mengurangi ukuran partikel. Pengurangan ukuran partikel terjadi karena beberapa mekanisme seperti impact atau kompresi yang disebabkan gaya yang bekerja hampir tegak lurus dengan permukaan partikel, chipping yang disebabkan oleh gaya yang bekerja dengan arah yang memiliki kemiringan dengan permukaan partikel, dan abrasi yang disebabkan oleh gaya yang bekerja sejajar dengan permukaan benda. Pompa aksial adalah pompa yang pada saat terjadi kenaikan kecepatan putaran pada *impeller*, aliran pada saluran *discharge* arahnya aksial (searah poros).



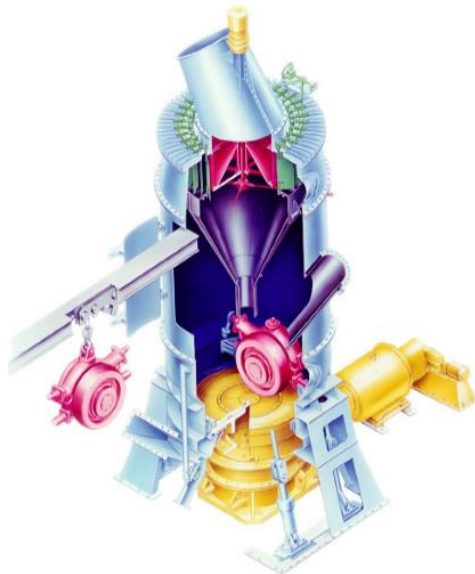
**Gambar 2.1** Mekanisme pemecahan partikel: (a) impact atau kompresi, (b) chipping, (c) abrasi. (Wills, 1988)



### 2.3 Vertical Roller Mill

Vertical roller mill adalah penggerus yang bekerja dengan mekanisme menghaluskan partikel dengan roller dan grinding table. Grinding table terhubung dengan poros pemutar sedangkan roller terhubung dengan hidrolis stasioner. Di sekitar grinding table terdapat nozzle gas panas dimana gas panas berfungsi menghantarkan partikel yang telah ditumbuk oleh roller ke *classifier* yang terletak di atas table dan secara bersamaan mengurangi kelembaban partikel. Partikel yang tidak melewati *classifier* dipantulkan kembali ke *grinding table* untuk ditumbuk kembali. Proses pemantulan partikel kasar dilakukan oleh grit cone sehingga partikel kasar jatuh tepat diatas grinding table.

Vertical roller mill banyak digunakan di industri semen untuk menghaluskan clinker ataupun menghaluskan batu bara yang digunakan untuk bahan bakar *rotary kiln*. PT Holcim Indonesia Tbk Tuban Plant menggunakan Polysius vertical roller mill di kedua plant-nya



**Gambar 2.2** Polysius vertical roller mill (PT Holcim Indonesia)



## 2.4 Analisa Kegagalan

Kegagalan atau kerusakan yang biasa terjadi bisa terjadi karena 2 hal yaitu karena umur pakai komponen yang sudah saat nya rusak atau memang karena adanya factor lain yang bisa menyebabkan kerusakan sehingga sebelum umur pakai nya komonen sudah mengalami kerusakan. Jika kerusakan terjadi sebelum umur pakai yang seharusnya maka dibutuhkan suatu analisa untuk mengetahui penyebab terjadinya kegagalan tersebut, sehingga selanjutnya kerusakanyang serupa dapat dihindari.

Menurut sumber-sumber penelitian yang ada di dunia industri (Brook & Choudury, 2002), faktor penyebab kegagalan yang sering terjadi di dunia industri dapat dikarenakan karena beberapa hal yaitu sebagai berikut:

**Faktor kesalahan Pemilihan Material**, pada tabel 2.1 dibawah ini menunjukkan statistik tentang permasalahan dalam masalah kegagalan material

**Tabel 2. 1** Permasalahan dalam kegagalan komponen mesin  
(Brook & Choudury, 2002)

Permasalahan	Prosentase (%)
Kesalahan pemilihan material	38
Cacat produksi	15
Kesalahan perlakuan panas	15
Kesalahan desain mekanik	11
Kondisi operasi yang berlebihan	8
Kondisi lingkungan yang tidak terkontrol	6
Pemeriksaan yang kurang baik	5
Material yang tidak jelas	2

**Perawatan Komponen yang Kurang Baik.** Proses perawatan komponen mesin yang kurang baik termasuk salah satu penyebab kegagalan yang paling dominan. Tabel 2.2 menunjukan data mengenai kasus kegagalan material yang terjadi.



**Tabel 2. 2** Kasus kegagalan material akibat perawatan komponen mesin  
(Brook & Choudury, 2002)

Permasalahan	Prosentase (%)
Perawatan yang kurang baik	44
Cacat saat fabrikasi	17
Defisiensi desain	16
Pemakaian yang abnormal	10
Cacat material	7
Penyebab yang tidak jelas	6

**Kesalahan dalam Perancangan Komponen.** Faktor kesalahan dalam proses perancangan komponen mesin adalah sebagai berikut:

- Kegagalan ulet akibat pembebanan yang melebihi kekuatan material
- Kegagalan getas akibat beban kejut
- Kegagalan pada temperatur tinggi (pemuluran)
- Static delayed fracture
- Proses perancangan yang terlalu banyak memicu konsentrasi tegangan seperti takikan
- Analisa tegangan komponen yang kurang detail yang menyebabkan rawan terjadi kegagalan akibat overload
- Kesalahan dalam menentukan material dari komponen mesin sehingga mempengaruhi hitungan yang dilakukan.

**Kondisi Kerja yang Ekstrim.** Permasalahan yang spesifik dalam kegagalan komponen mesin akibat kondisi kerja yang ekstrim disajikan dalam Tabel 2.3 berikut ini:

**Tabel 2. 3** Kasus kegagalan material akibat kondisi kerja yang ekstrim  
(Brook & Choudury, 2002)



Permasalahan	Prosentase (%)
Korosi	29
Kelelahan (fatigue)	25
Kegagalan getas (brittle fracture)	16
Kelebihan beban	11
Korosi temperature tinggi	7
Korosi SCC, korosi lelah penggetasan hidrogen	6
Pemuluran	3
Abrasi, erosi	3

## 2.5 Teori Wear

*Wear* atau aus bisa didefinisikan sebagai kerusakan permukaan yang disebabkan oleh lingkungan dan efek dari satu atau lebih permukaan yang bergerak bersentuhan satu sama lain membentuk kontak. Lipson (1967) mengklasifikasikan wear menjadi beberapa kategori:

### Galling (lecet)

*Wear* atau aus tipe ini dianggap disebabkan oleh adhesi antara dua permukaan kasar yang bersentuhan yang ditempelkan dan mengalami tegangan geser oleh gerak relative antara dua permukaan yang bergerak. Bagian *weld* yang “kuat” akan memindahkn material dari satu permukaan ke permukaan lainnya. Bagian *weld* yang “lemah” akan memproduksi partikel longgar. *Galling* yang terjadi terus menerus akan menyebabkan cacat pada permukaan dan merusak komponen yang bergerak. Pemilihan material yang tepat dan pelumasan dapat membantu mencegah *galling*.

### Abrasi

partikel longgar, bagian permukaan yang kasar, dan benda asing tertentu yang menggerus suatu permukaan menyebabkan aus. Partikel – partikel tersebut bergabung pada permukaan yang lebih lunak dan cenderung menyebabkan goresan pada permukaan yang



lebih kasar. Abrasi, walaupun tidak bisa dihilangkan, bisa dikendalikan dengan perlakuan panas, plating, spraying, hardfacing, atau pengerasan permukaan.

### **Pitting**

Jenis aus ini disebabkan oleh tegangan kontak yang terjadi secara berulang dan merupakan salah satu bentuk fatigue permukaan.

### **Frettagge (ukir)**

*Frettagge* adalah kerusakan pada permukaan yang disebabkan oleh pergerakan kecil dari dua permukaan yang bergabung, seperti pada cetakan press. Osilasi konstan menghilangkan lapisan oksida yang mungkin terbentuk, yang akhirnya berperan sebagai partikel yang mengabrasi dan menyebabkan kerusakan yang lebih parah.

### **Erosi kavitasi**

Erosi kavitasi disebabkan oleh gerak relative tinggi antara fluida dan permukaan mekanika. Apabila kecepatan fluida cukup tinggi, tekanan statis lokal pada titik tertentu akan menurun menjadi dibawah tekanan uap liquid. Pendidihan lokal terjadi membentuk gelembung – gelembung. Karena prinsip ekuilibrium, gelembung akan pecah dan membentuk partikel cair dengan kecepatan tinggi. Energi yang tinggi ini menubruk permukaan logam dan menyebabkan kavitasi. Kejadian berulang dari fenomena ini akan menyebabkan kegagalan fatigue pada logam.

### **Korosi galvanis**

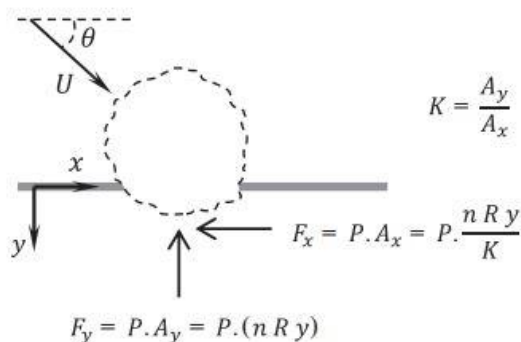
Korosi galvanis adalah bentuk serangan elektrokimia dimana dua logam berbeda terhubung dalam aliran listrik di dalam suatu elektrolit. Model tersebut menyebabkan sel galvanis, dan kerusakan disebabkan oleh terlarutnya anoda. Laju dari serangan tergantung kepada jenis material yang terhubung, luas permukaan logam, jenis elektrolit, densitas arus, polarisasi dari katoda dan temperature. (Deutschman, 1975)



## 2.6 Wear disebabkan oleh Partikel Solid

Erosi dari metrial yang disebabkan tubrukan partikel solid adalah salah satu bentuk degradasi wear atau aus yang membahayakan integritas dari flow boundares dan fungsi dari komponen bergerak dalam aliran yang mengandung partikel. Aplikasi ini tidak terbatas pada produksi, proses, dan fasilitas transportasi perminyakan, power plant, atau industri dirgantara. Produksi pasir dari cadangan minyak dan gas bisa menyebabkan erosi cepat dan aus dari komponen produksi dan proses serta jalur transportasi (Arabnejad, 2014). Maka, memprediksi erosi yang disebabkan berbagai ukuran dan bentuk partikel solid merupakan kebutuhan penting baik dari segi ekonomi maupun segi keamanan. Pendekatan komprehensif untuk memprediksi kerusakan erosi dari suatu geometri dan aliran tertentu mempunyai tiga bidang utama, yaitu flow modeling, particle tracking, dan erosion prediction. Saat ini, kebanyakan studi lebih bermanfaat untuk memahami perilaku material selama dikenai dampak dan karakterisasi dari mekanisme erosi, dibandingkan mengkalkulasi erosi dari kondisi tertentu.

Erosi disebabkan adanya partikel yang bergerak dan bertumbukan sengan suatu permukaan. Partikel tersebut mempunyai gaya yang mempertahankan gerak yang ditunjukkan pada gambar 2.3.



**Gambar 2.3** Ksetimbangan gaya pada partikel yang bersinggungan dengan permukaan.(Arabnejad, 2014)



Dimana  $m$  adalah massa partikel,  $P$  adalah pressure aliran yang diasumsikan sebagai nilai kekerasan Vickers dari material,  $n$  adalah rasio area kontak antara partikel dengan material, dan  $R$  adalah ukuran partikel. Dewasa ini, banyak studi literature yang menunjukkan bahwa efek dari ukuran partikel pada erosi tidak banyak berpengaruh untuk partikel dengan ukuran lebih besar dari  $100\text{ }\mu\text{m}$  (Arabnejad, 2015)

## **2.7 Impact-abrasive Wear**

*Impact-abrasive wear* bisa dianggap sebagai sub-kategori dari *impact wear*. dalam hal ini, mekanisme dari dua aus ini terpisah, dimana kontak terjadi tanpa media abrasive dan tanpa adanya gerakan sliding, sementara media abrasive adalah komponen utama dalam hal keausan. abrasi impak tidak mempunyai definisi yang tetap, tetapi sudah digunakan dalam berbagai artikel ilmiah untuk menggambarkan kondisi aus yang mempunyai komponen abrasive dan komponen impak. Ukuran partikel yang terlibat dalam abrasi impak biasanya berukuran  $10 - 100\text{ }\mu\text{m}$  (Ratia, 2015)

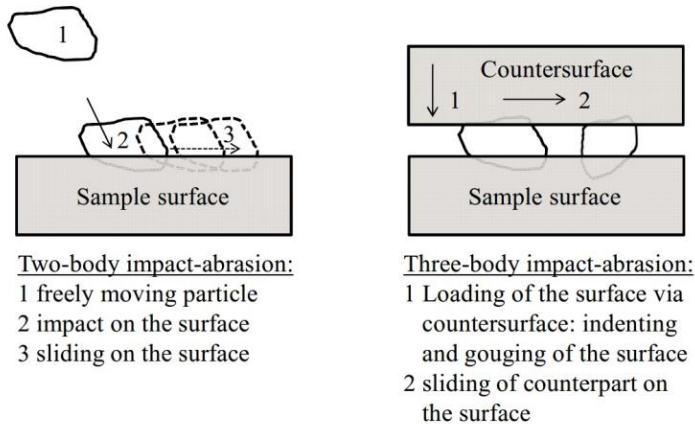
Kondisi terjadinya abrasi impak sangat beragam, secara umum bisa dibagi menjadi dua, yaitu:

1. Abrasi impak dengan dua benda kerja: satu benda menimbulkan kontak secara impak dan abrasive pada material. Hal ini terjadi saat partikel menumbuk permukaan material dan meluncur setelah impak. Peristiwa ini terjadi hanya antara material dan media abrasif.
2. Abrasi impak dengan tiga benda kerja : Beban impak dan gerakan meluncur dari partikel setelah impak disebabkan oleh benda eksternal. Antar muka antara benda eksternal dengan benda yang akan terabrasi terdapat media abrasi, yang menyebabkan terjadinya abrasi. Tiga benda kerja yang terdapat dalam proses ini yaitu permukaan material,





media abrasif, dan komponen yang menyebabkan beban impact. (Ratia, 2015)



**Gambar 2.4** Abrasi impact dengan dua benda kerja dan tiga benda kerja. (Ratia, 2015)

## 2.8 Analisa *Explicit Dynamic*

Pada penelitian ini penulis menggunakan analisa explicit dynamic, dimana terdapat beberapa perbedaan dengan analisa implisit. Dalam analisa statis, efek dari masa (inersia) dan/atau damping tidak diperhitungkan, berbeda dengan analisa dinamis dimana gaya pada node berhubungan dengan efek inersia dan damping

Dalam analisa implisit nonlinier, hasil dari setiap langkah perhitungan membutuhkan beberapa iterasi untuk membentuk kesetimbangan dengan toleransi tertentu. Pada analisa eksplisit, iterasi tidak dibutuhkan karena akselerasi dari node dihitung secara langsung.

Dalam analisa dinamis eksplisit, akselerasi node diselesaikan langsung tanpa iterasi dengan melakukan inversi pada diagonal matriks massa dikalikan dengan vector tegangan node dimana tegangan node dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti *pressure*,



*body forces*, kontak permukaan, tegangan elemen, *damping*, *bulk viscosity*, dan *hourglass control*. (LSTC, 2006)

## 2.9 Elemen Solid Shell

Pada penelitian yang dilakukan secara explicit dynamic menggunakan element brick delapan node dengan acuan persamaan shell Hudhes-Liu dan Belytschko-Lin-Tsay. Dimana geometri diinterpolasikan dari kordinat titik node sebagai

$$x_i(X_\alpha, t) = x_i(X_\alpha(\xi, \eta, \zeta), t) = \sum_{j=1}^8 \phi_j(\xi, \eta, \zeta) x_i^j(t) \quad (2.1)$$

dimana fungsi bentuk  $\phi_j$  didefinisikan sebagai

$$\phi_j = \frac{1}{8} (1 + \xi \xi_j) (1 + \eta \eta_j) (1 + \zeta \zeta_j) \quad (2.2)$$

dimana  $\xi_j, \eta_j, \zeta_j$  mempunyai nilai node  $(\pm 1, \pm 1, \pm 1)$  dan  $x_j^i$  adalah koordinat node ke- $j$  dalam arah ke- $i$  seperti pada gambar 2.4

Sebagai sebuah elemen solid, N adalah matriks interpolasi kotak 3 x 24

$$N(\xi, \eta, \zeta) = \begin{bmatrix} \phi_1 & 0 & 0 & \phi_2 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & \phi_1 & 0 & 0 & \phi_2 & \dots & \phi_8 & 0 \\ 0 & 0 & \phi_1 & 0 & 0 & \dots & 0 & \phi_8 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

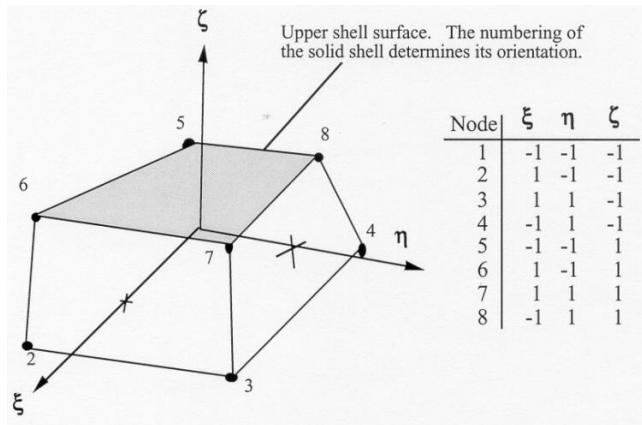
$\sigma$  adalah vektor tegangan:

$$\sigma^t = (\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}, \sigma_{xy}, \sigma_{yz}, \sigma_{zx}) \quad (2.4)$$

dan B adalah matriks *strain-displacement* 6 x 24



$$B = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial x} & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$



**Gambar 2.5** *eight node solid shell element*

Matriks strain-displacement sudah siap untuk dikalkulasi. Tandai bahwa

$$\begin{aligned} \frac{\partial \phi_i}{\partial \xi} &= \frac{\partial \phi_i}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial \xi} + \frac{\partial \phi_i}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial \xi} + \frac{\partial \phi_i}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial \xi} \\ \frac{\partial \phi_i}{\partial \eta} &= \frac{\partial \phi_i}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial \eta} + \frac{\partial \phi_i}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial \eta} + \frac{\partial \phi_i}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial \eta} \\ \frac{\partial \phi_i}{\partial \zeta} &= \frac{\partial \phi_i}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial \zeta} + \frac{\partial \phi_i}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial \zeta} + \frac{\partial \phi_i}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial \zeta} \end{aligned} \quad (2.6)$$



bisa ditulis ulang sebagai

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial \phi_i}{\partial \xi} \\ \frac{\partial \phi_i}{\partial \eta} \\ \frac{\partial \phi_i}{\partial \zeta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \xi} & \frac{\partial z}{\partial \xi} \\ \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \eta} & \frac{\partial z}{\partial \eta} \\ \frac{\partial x}{\partial \zeta} & \frac{\partial y}{\partial \zeta} & \frac{\partial z}{\partial \zeta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial \phi_i}{\partial x} \\ \frac{\partial \phi_i}{\partial y} \\ \frac{\partial \phi_i}{\partial z} \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} \frac{\partial \phi_i}{\partial x} \\ \frac{\partial \phi_i}{\partial y} \\ \frac{\partial \phi_i}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

dengan melakukan invers pada matriks Jacobian,  $J$ , bisa didapatkan bentuk

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial \phi_i}{\partial x} \\ \frac{\partial \phi_i}{\partial y} \\ \frac{\partial \phi_i}{\partial z} \end{bmatrix} = J^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial \phi_i}{\partial \xi} \\ \frac{\partial \phi_i}{\partial \eta} \\ \frac{\partial \phi_i}{\partial \zeta} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Untuk mendapatkan perilaku seperti shell dari sebuah elemen solid, penting untuk menggunakan beberapa titik integrasi sepanjang ketebalan shell di sepanjang sumbu  $\xi$  ketika memberikan tekanan pada bidang. Oleh karena itu, penting untuk menyusun permukaan acuan di dalam komponen shell. Pada elemen shell Belytschko-Lin-Tsay permukaan acuan terletak di antara permukaan atas dan permukaan bawah dengan persamaan matriks

$$\{A\} = \begin{Bmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{1x} & e_{2x} & e_{3x} \\ e_{1y} & e_{2y} & e_{3y} \\ e_{1z} & e_{2z} & e_{3z} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \hat{A}_x \\ \hat{A}_y \\ \hat{A}_z \end{Bmatrix} = [\mu] \{\hat{A}\} = [q]^T \{\hat{A}\} \quad (2.9)$$

seperti pada shell Hughes-Liu, langkah berikutnya adalah melakukan pembaruan pada *Jaumann rate*



$$\underline{\sigma}_{ij}^{n+1} = \sigma_{ij}^n + \sigma_{ij}^n \Delta \omega_{pj} + \sigma_{jp}^n \Delta \omega_{pi} \quad (2.10)$$

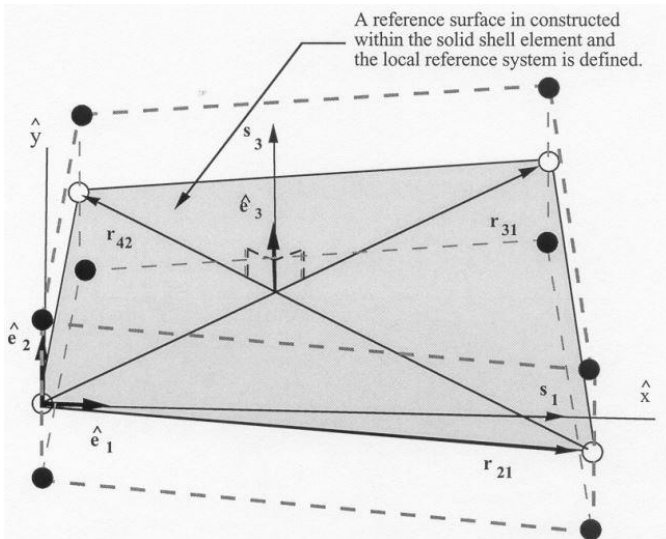
untuk menghitung rotasi material antara *time steps*  $n$  dan  $n+1$ . Pembaruan Jaumann rate pada tensor tegangan diaplikasikan pada konfigurasi global sebelum evaluasi pokok dilakukan. Di dalam solid shell seperti shell Hughes-Liu, stress dan histori variabel tersimpan di sistem koordinat global. Untuk mengevaluasi hubungan pokok, kenaikan tegangan dan regangan dirotasikan dari koordinat global ke sistem koordinat lokal menggunakan transformasi yang dinyatakan dengan:

$$\underline{\sigma}_{ij}^{l^{n+1}} = q_{ik} \underline{\sigma}_{kn}^{n+1} q_{jn} \quad (2.11)$$

$$\Delta \varepsilon_{ij}^{l^{n+1/2}} = q_{ik} \Delta \varepsilon_{kn}^{n+1/2} q_{jn} \quad (2.12)$$

Dimana pangkat 1 menunjukkan komponen berada di sistem koordinat local. Tegangan diperbarui setiap ada kenaikan:

$$\sigma_{ij}^{l^{n+1}} = \underline{\sigma}_{ij}^{l^{n+1}} + \Delta \sigma_{ij}^{l^{n+1/2}} \quad (2.13)$$



**Gambar 2.6** Konstruksi permukaan acuan elemen shell solid  
Terpisah dari evaluasi pokok



$$\sigma_{33}^l = 0 \quad (2.14)$$

yang memastikan bahwa kondisi tegangan permukaan terpenuhi, pembaruan dilakukan pada tegangan normal yang digunakan sebagai toleransi untuk menjaga ketebalan dari shell:

$$\sigma_{33}^{penalty^{n+1}} = \sigma_{33}^{penalty^{n+1}} + E\Delta\varepsilon_{33}^l \quad (2.15)$$

dimana E adalah modulus Young dari material. Persamaan tensor tegangan dirotasikan kembali ke sistem global:

$$\sigma_{ij}^{n+1} = q_{ki}\sigma_{kn}^{l^{n+1}}q_{nj} \quad (2.16)$$

Toleransi tensor tegangan kemudian dibentuk dengan cara mentransformasikan toleransi normal tensor tegangan kembali ke sistem global:

$$\sigma_{ij}^{penalty^{n+1}} = q_{ki}\sigma_{kn}^{penalty^{n+1}}q_{nj} \quad (2.17)$$

sebelum menghitung vektor gaya internal. Gaya internal bisa dihitung dengan:

$$f^{int} = \int B^{t^{n+1}} [\sigma^{n+1} + \sigma^{penalty^{n+1}}] dv \quad (2.18)$$

brick shell menunjukkan tidak ada masalah apabila pendekatan tersebut diaplikasikan (Hallquist, 2006)

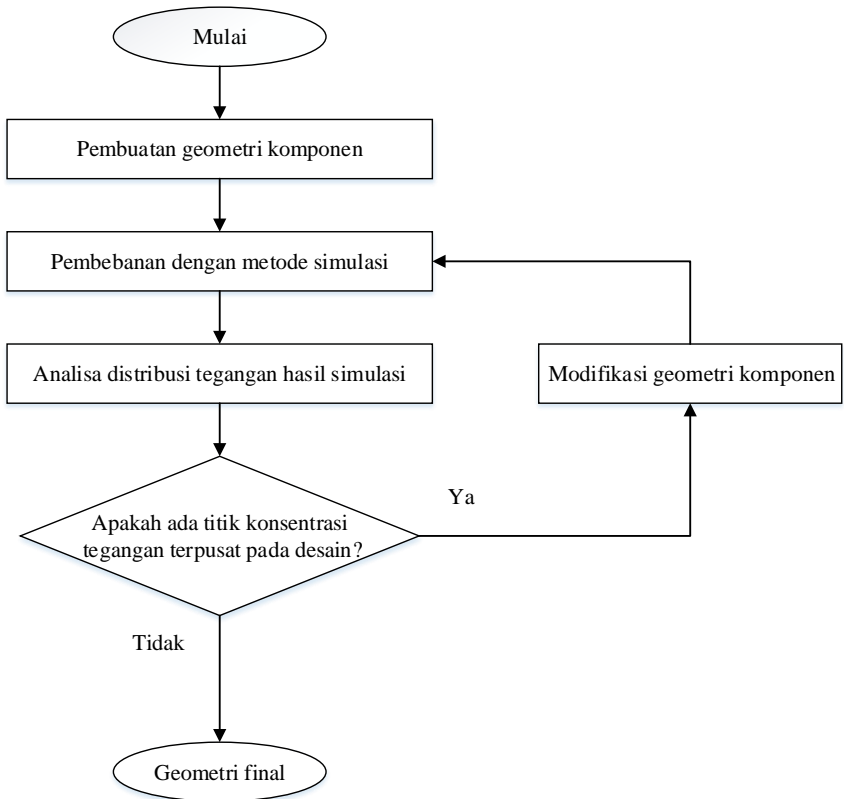


*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## **BAB III METODOLOGI PENELITIAN**

### **3.1 Diagram Alir Penelitian**

Diagram alir pada penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut :



**Gambar 3. 1** Diagram Alir Penelitian



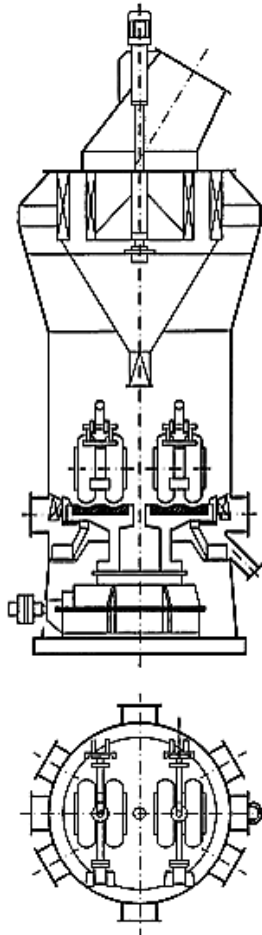


---

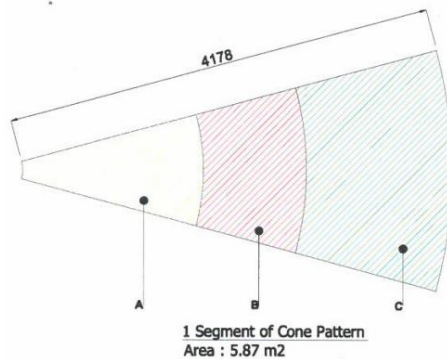
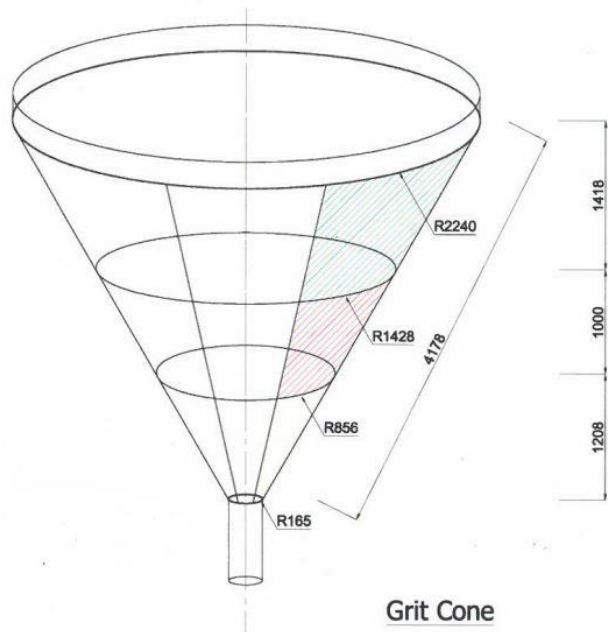
## 3.2 Materi Penelitian

### 3.2.1 *Vertical Roller Mill*

Objek yang diamati pada penelitian ini adalah komponen *gritcone* pada Polysius *vertical roller mill* yang dapat dilihat di gambar 3.2 dan gambar 3.3



**Gambar 3. 2** Gambar 2D Polysius *vertical roller mill*



**Gambar 3. 3** Gambar 2D *grit cone* (PT Holcim Indonesia)



Material yang digunakan pada komponen *grit cone vertical roller mill* adalah Thyssenkrupp XAR® 400 dengan spesifikasi sebagai berikut:

**Tabel 3. 1** Komposisi Kimia Thyssenkrupp XAR® 400  
(Thyssenkrupp, 2014)

Unsur	Kadar (%)
Carbon	$\leq 0,20$
Silicon	$\leq 0,80$
Manganese	$\leq 1,50$
Phosporus	$\leq 0,020$
Sulfur	$\leq 0,007$
Chromium	$\leq 1,00$
Molybdenum	$\leq 0,50$
Boron	$\leq 0,005$

**Tabel 3. 2** Sifat Mekanik Thyssenkrupp XAR® 400  
(Thyssenkrupp, 2014)

Sifat mekanik	XAR® 400
Kekuatan luluh (MPa)	1000
Kekuatan tarik (Mpa)	1250
Elongasi saat patah	10 %
Energi impak (J)	27
Kekerasan (Brinnel)	400±30

### 3.2.2 Batubara Bituminous

Batubara yang diproses di dalam Vertical Roller Mill di PT Holcim Indonesia Tuban Plant adalah batubara jenis Bituminous. Bituminous adalah batubara yang relatif lunak dan mengandung zat seperti tar yang bernama bitumen. Batubara jenis ini adalah batubara yang mempunyai kualitas yang rendah dibandingkan antrasit tetapi lebih tinggi dibandingkan lignit. Batubara ini



dikenal sebagai batubara yang mempunyai kandungan gas bahan bakar (firedamp) yang cukup tinggi. Data – data properti batubara didapat dari jurnal (Chi Ai, 2013). Untuk komposisi kimia dan properti materialnya disajikan di tabel 3.3

**Tabel 3. 3** Kompoisi kimia batubara Bituminous

Sifat mekanik	Bituminous
Kekuatan tarik (Mpa)	1641
Poisson's ratio	0.35
Kekerasan (Vickers)	10 – 70

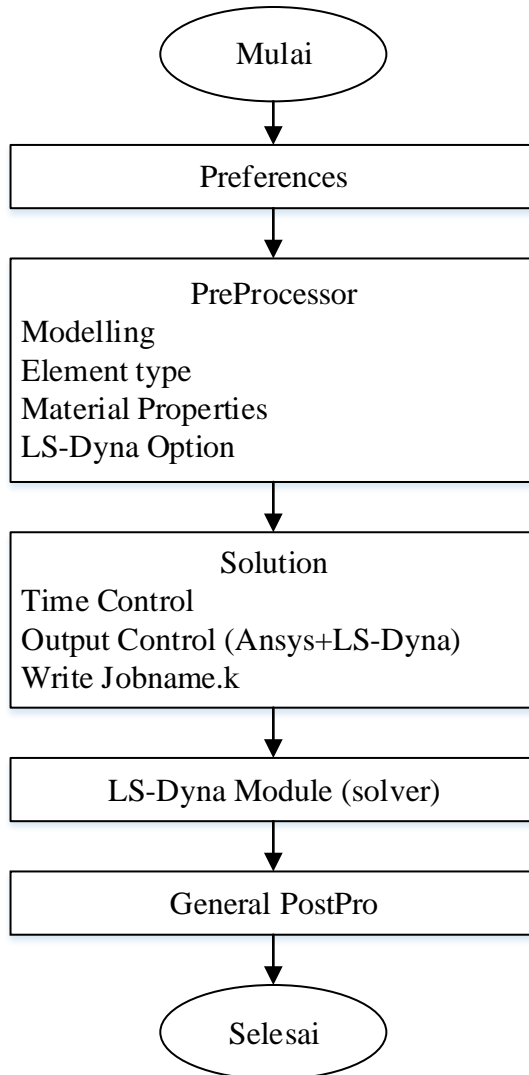
### 3.2.3 Peralatan Penelitian

Peralatan yang digunakan dalam penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. ANSYS merupakan suatu perangkat lunak komputer yang mampu menyelesaikan persoalan-persoalan elemen hingga dari pemodelan hingga analisis dengan keakuratan yang cukup tinggi.

### 3.3 Pemodelan dengan ANSYS 17.1

Adapun diagram alir pemodelan *gritcone vertical roller mill* dengan menggunakan ANSYS Mechanical APDL Release 17.1 dapat dilihat pada gambar 3.4



**Gambar 3. 4** Diagram alir pemodelan menggunakan software ANSYS



### 3.3.1 Pemodelan *Gritcone Vertical Roller Mill*

Terdapat 2 jenis desain *grit cone* pada penelitian ini yaitu desain (1) *grit cone* tanpa modifikasi geometri dan (2) *grit cone* yang telah mengalami modifikasi geometri, desain dibuat di ANSYS Mechanical APDL Release 17.1. Tipe elemen yang digunakan adalah Thin Shell 163 dan 3D Mass 166.

### 3.3.2 Parameter Penelitian

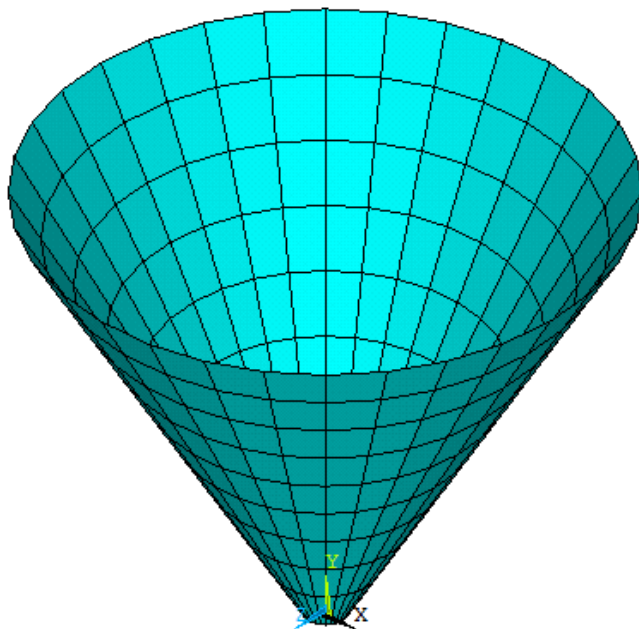
Pada penelitian ini dilakukan input data material Thyssenkrupp XAR® 400 sebagai bahan penyusun *grit cone* pada Polysius *vertical roller mill*, data sifat mekanik material pada tabel 3.2 dimasukkan ke dalam data linear isotropik. Pengujian *explicit dynamic* dilakukan dengan mensimulasikan proses operasi *vertical roller mill* untuk menganalisa interaksi antara partikel (batu bara) dengan permukaan benda (*grit cone*). Adapun parameter yang digunakan dibagi menjadi beberapa jenis seperti *initial velocity (on nodes)*, *acceleration y-axis (on nodes)*, dan *termination time* disajikan dalam tabel 3.3

**Tabel 3. 4** Parameter Penelitian

Parameter	Value	
Initial velocity on nodes (m/s <sup>2</sup> )	V <sub>x</sub>	0
	V <sub>y</sub>	0
	V <sub>z</sub>	0
Acceleration on nodes (m/s <sup>2</sup> )		9.81
Termination time (s)		2

### 3.3.3 Meshing

Metode *meshing* yang digunakan pada desain *grit cone* adalah metode *mapped mesh* dengan ukuran 0.5, berikut merupakan gambar hasil meshing model dari komponen *grit cone* dengan geometri awal (tanpa modifikasi), terlihat pada gambar 3.5



**Gambar 3. 5** Hasil meshing *gritcone* vertical roller mill desain awal

### 3.4 Rancangan Penelitian

Pada penelitian ini dilakukan analisis distribusi tegangan pada masing-masing desain sehingga pada akhir penelitian dapat dilihat nilai tegangan terendah dan tertinggi dari desain tersebut dan juga dapat diketahui titik-titik kritis dari komponen tersebut. Desain yang di analisis adalah sebagai berikut:

1. Desain asli, yaitu desain dengan geometri yang sama dengan geometri yang telah ada tanpa dilakukan modifikasi
2. Desain dengan modifikasi kemiringan dinding grit cone yaitu pada daerah yang mengalami kerusakan kemiringan



dinding *gritcone* diperkecil dengan demikian diharapkan konsentrasi tegangan pada dinding *grit cone* akan lebih kecil dibandingkan dengan desain asli *grit cone*

Secara garis besar rancangan penelitian yang dilakukan pada tugas akhir ini bisa dilihat pada table

**Tabel 3. 5** Tabel Rancangan Penelitian

Case	Ukuran Partikel ( $\mu\text{m}$ )	Gritcone		Ketebalan (m)
		Atas (m)	Bawah (m)	
1	100	2.24	0.165	0.01
2	100	2.24	0.215	0.01
3	100	2.24	0.265	0.01
4	100	2.24	0.315	0.01
5	100	2.24	0.365	0.01
6	100	2.24	0.165	0.02
7	100	2.24	0.215	0.02
8	100	2.24	0.265	0.02
9	100	2.24	0.315	0.02
10	100	2.24	0.365	0.02

Berikut ini adalah rancangan penelitian atau Timeline dari dari percobaan kali ini:

**Tabel 3.6** Tabel timeline penelitian dari percobaan kali ini

Minggu ke-														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Pembuatan Proposal														
pembuatan Geometri														





---

Simulasi dengan variasi geometri														
Analisa Simulasi														
Pembuatan Laporan														
Sidang														

## BAB IV

### HASIL DAN PEMBAHASAN

Beberapa kasus simulasi mengenai fenomena abrasi telah dilakukan pada berbagai kondisi yang berbeda, dimana seluruhnya dilakukan dengan analisis dinamik eksplisit dengan pemberian beban berupa abrasi yang dilakukan oleh partikel batubara dengan massa  $4.36 \times 10^{-10}$  kg dan kecepatan awal 0 m/s. Proses simulasi menggunakan termination time 2 detik. Hasil yang didapatkan dari simulasi berupa ketebalan pada dinding *gritcone*.

**Tabel 4.1** Kondisi Simulasi Kegagalan

Case	Ukuran Partikel ( $\mu\text{m}$ )	Gritcone		Ketebalan (m)
		Atas (m)	Bawah (m)	
1	100	2.24	0.165	0.01
2	100	2.24	0.215	0.01
3	100	2.24	0.265	0.01
4	100	2.24	0.315	0.01
5	100	2.24	0.365	0.01
6	100	2.24	0.165	0.02
7	100	2.24	0.215	0.02
8	100	2.24	0.265	0.02
9	100	2.24	0.315	0.02
10	100	2.24	0.365	0.02

Dari simulasi yang telah dilakukan, didapatkan hasil ketebalan minimal dan maksimal dinding *gritcone* setelah diabrasikan dengan partikel batubara dengan menggunakan software LS-Dyna PrePost sehingga mendapatkan distribusi ketebalan *gritcone*. Hasil ketebalan maksimal dan minimal dari *gritcone* disajikan pada tabel 4.2 berikut ini.


**Tabel 4.2 Hasil Simulasi Kegagalan**

Case	Ketebalan awal (m)	Ketebalan akhir		$\Delta T$ (m)
		Minimal (m)	Maksimal (m)	
1	0.01	0.00998577	0.0099946	$1.423 \times 10^{-5}$
2	0.01	0.00998631	0.00999243	$1.369 \times 10^{-5}$
3	0.01	0.00998769	0.00999284	$1.231 \times 10^{-5}$
4	0.01	0.00999104	0.00999353	$8.96 \times 10^{-6}$
5	0.01	0.00999149	0.00999502	$8.51 \times 10^{-6}$
6	0.02	0.0199755	0.0199938	$2.45 \times 10^{-5}$
7	0.02	0.0199812	0.0199903	$1.88 \times 10^{-5}$
8	0.02	0.019981	0.01999	$1.9 \times 10^{-5}$
9	0.02	0.0199791	0.0199876	$2.09 \times 10^{-5}$
10	0.02	0.019981	0.0199895	$1.9 \times 10^{-5}$

Tabel 4.2 menunjukkan hasil simulasi kegagalan abrasi dari tiap – tiap kasus yang menunjukkan adanya kecenderungan menurunnya tingkat abrasi seiring dengan semakin besarnya radius bawah dari *gritcone* yang ditunjukkan dengan adanya peningkatan pada nilai ketebalan minimal dinding *gritcone*.

#### 4.1 *Gritcone* dengan ketebalan 0.01 m

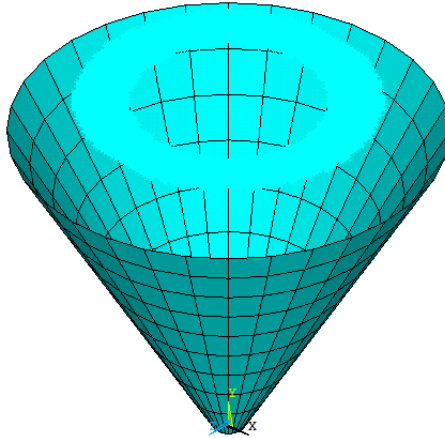
Pada bagian ini, dibahas pengaruh ketebalan *gritcone* terhadap pola patahan *gritcone* yang diinisiasi oleh keausan dengan membandingkan ukuran radius bawah pada *gritcone*. Patahan akan mulai terbentuk dari dinding *gritcone* yang mengalami tingkat keausan tertinggi ditandai dengan ketebalan dinding yang paling minimum. Agar didapatkan hasil yang akurat maka simulasi dilakukan dengan lima variable radius yaitu  $r = 0.165$  m,  $r = 0.215$  m,  $r = 0.265$  m,  $r = 0.315$  m, dan  $r = 0.365$  m.

##### 4.1.1 Pengaruh Geometri *Gritcone* dengan $r = 0.165$ m

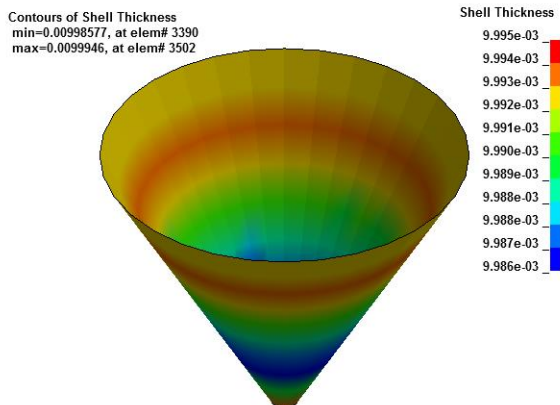
Geometri *gritcone* yang disimulasikan terdapat pada gambar 4.1 dimana *gritcone* mempunyai radius bawah sebesar 0.165 m dan ketebalan *gritcone* sebesar 0.01 m. Geometri ini disimulasikan



dengan mengabrasikan partikel batubara dengan massa  $4.36 \times 10^{-10}$  kg. partikel tersebut bergerak dari kecepatan awal 0 m/s dengan percepatan sebesar  $9.81 \text{ m/s}^2$



**Gambar 4.1** Geometri *Gritcone* dengan Radius Bawah  $r = 0.165 \text{ m}$

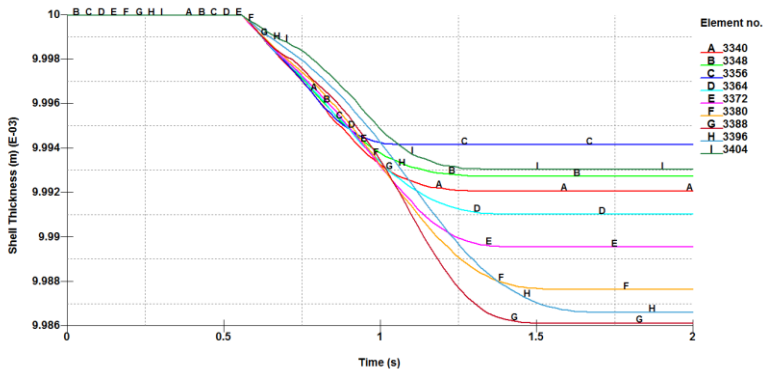


**Gambar 4.2** Distribusi Ketebalan pada Dinding *Gritcone* dengan Radius Bawah  $r = 0.165 \text{ m}$

Gambar 4.2 menunjukkan distribusi ketebalan dinding *gritcone* setelah disimulasikan. Didapat area pada dinding *gritcone*



yang memiliki ketebalan paling rendah dibandingkan dengan area lainnya yaitu sebesar 0.00998577 m. Area yang memiliki ketebalan paling rendah menunjukkan tingkat keausan yang paling tinggi dan adanya potensi terbentuk *initial crack* pada area tersebut.



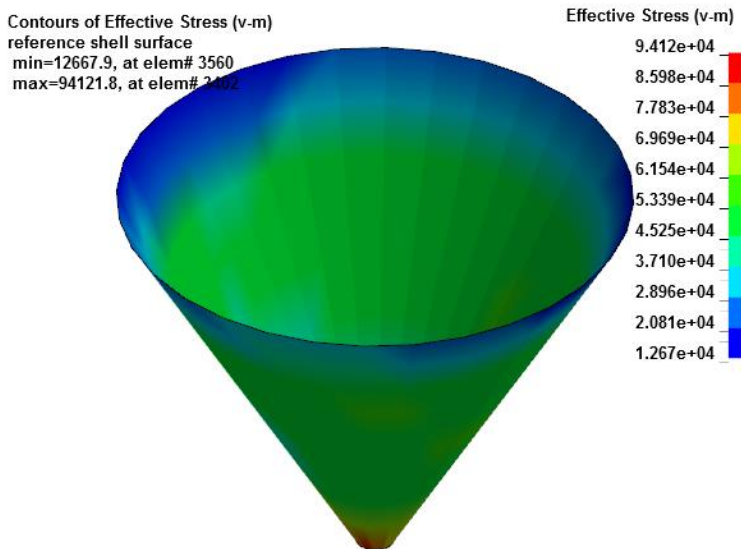
**Gambar 4.3** Grafik *time vs shell thickness Gritcone case 1*

Gambar 4.3 menunjukkan grafik *time vs shell thickness*. Dari gambar 4.3 dapat dilihat penurunan ketebalan dinding gritcone mulai terjadi pada saat  $t = \pm 0.6$  s. Penurunan ketebalan terjadi hingga  $t = \pm 1.6$  s pada dinding gritcone. Dinding gritcone yang memiliki ketebalan paling rendah berada pada element 3388 atau pada ketinggian 0.9 – 1.2 m dari dasar *gritcone*.

Distribusi tegangan yang terjadi pada dinding gritcone digambarkan pada gambar 4.4. Tegangan yang terjadi adalah tegangan Von Mises dengan komponen tegangan pada sumbu x, y dan z. Tegangan yang terjadi adalah tegangan yang disebabkan oleh pembebanan berupa partikel yang menumbuk dinding gritcone. Bagian dinding *gritcone* yang dikenai tegangan lebih tinggi dibandingkan bagian lainnya mengalami kerusakan sebanding dengan besarnya tegangan yang terjadi pada permukaan tersebut. Hal ini menunjukkan semakin tinggi tegangan yang



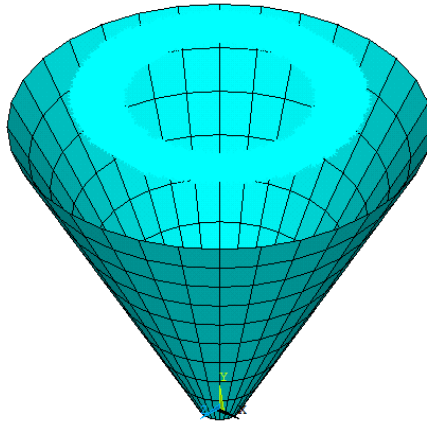
disebabkan tumbukan partikel dengan dinding *gritcone* semakin tinggi pengurangan ketebalan yang terjadi pada dinding *gritcone*.



**Gambar 4.4** Distribusi tegangan Von Mises pada Dinding *Gritcone* dengan Radius Bawah  $r = 0.165$  m

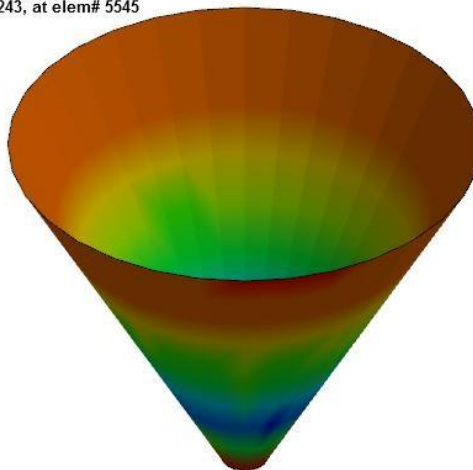
#### 4.1.2 Pengaruh Geometri *Gritcone* dengan $r = 0.215$ m

Geometri *Gritcone* yang disimulasikan terdapat pada gambar 4.5 dimana *gritcone* mempunyai radius bawah sebesar 0.215 m ketebalan *gritcone* sebesar 0.01 m. Geometri ini disimulasikan dengan mengabrasikan partikel batu bara dengan massa  $4.36 \times 10^{-10}$  kg. partikel tersebut bergerak dari kecepatan awal 0 m/s dengan percepatan sebesar  $9.81 \text{ m/s}^2$

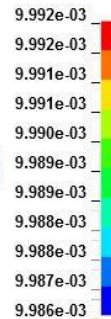


**Gambar 4.5** Geometri *Gritcone* dengan Radius Bawah  $r = 0.215$  m

Contours of Shell Thickness  
min=0.00998631, at elem# 5607  
max=0.00999243, at elem# 5545



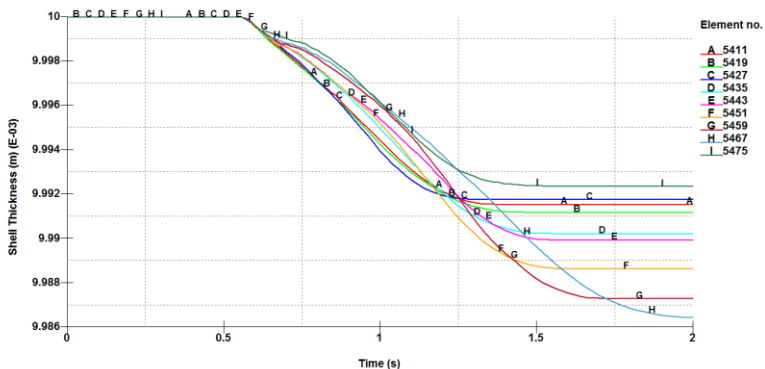
Shell Thickness



**Gambar 4.6** Distribusi Ketebalan pada Dinding *Gritcone* dengan Radius Bawah  $r = 0.215$  m



Gambar 4.6 menunjukkan distribusi ketebalan dinding *gritcone* setelah disimulasikan. Didapat area pada dinding *gritcone* yang memiliki ketebalan paling rendah dibandingkan dengan area lainnya yaitu sebesar 0.00998631 m. Area yang memiliki ketebalan paling rendah menunjukkan tingkat keausan yang paling tinggi dan adanya potensi terbentuk *initial crack* pada area tersebut.



**Gambar 4.7** Grafik *time vs shell thickness Gritcone case 2*

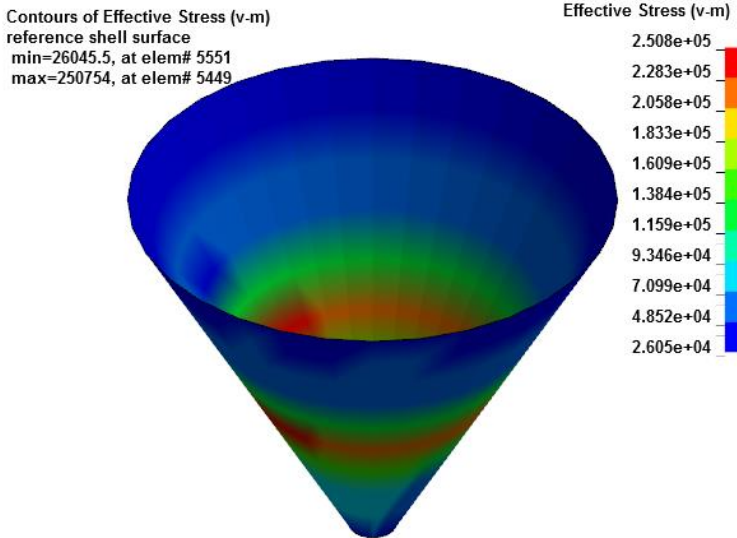
Gambar 4.7 menunjukkan grafik *time vs shell thickness*. Dari gambar 4.7 dapat dilihat penurunan ketebalan dinding *gritcone* mulai terjadi pada saat  $t = \pm 0.6$  s. Penurunan ketebalan terjadi hingga  $t = \pm 1.6$  s pada dinding *gritcone*. Dinding *gritcone* yang memiliki ketebalan paling rendah berada pada element 5467 atau pada ketinggian 0.5 – 0.8 m dari dasar *gritcone*.

Distribusi tegangan yang terjadi pada dinding *gritcone* digambarkan pada gambar 4.8. Tegangan yang terjadi adalah tegangan Von Mises dengan komponen tegangan pada sumbu x, y dan z. Tegangan yang terjadi adalah tegangan yang disebabkan oleh pembebanan berupa partikel yang menumbuk dinding *gritcone*. Bagian dinding *gritcone* yang dikenai tegangan lebih tinggi dibandingkan bagian lainnya mengalami kerusakan sebanding dengan besarnya tegangan yang terjadi pada permukaan





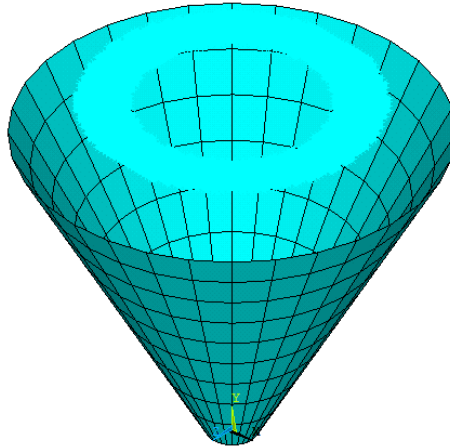
tersebut. Hal ini menunjukkan semakin tinggi tegangan yang disebabkan tumbukan partikel dengan dinding *gritcone* semakin tinggi pengurangan ketebalan yang terjadi pada dinding *gritcone*.



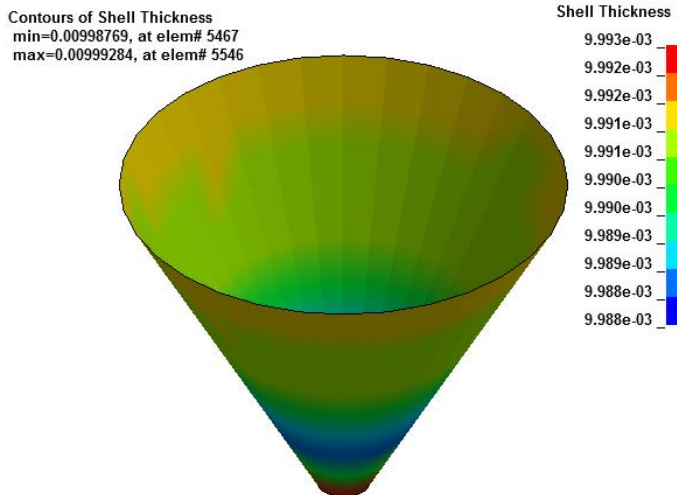
**Gambar 4.8** Distribusi tegangan Von Mises pada Dinding *Gritcone* dengan Radius Bawah  $r = 0.215$  m

#### 4.1.3 Pengaruh Geometri *Gritcone* dengan $r = 0.265$ m

Geometri *Gritcone* yang disimulasikan terdapat pada gambar 4.9 dimana *gritcone* mempunyai radius bawah sebesar 0.265 m ketebalan *gritcone* sebesar 0.01 m. Geometri ini disimulasikan dengan mengabrasikan partikel batu bara dengan massa  $4.36 \times 10^{-10}$  kg. partikel tersebut bergerak dari kecepatan awal 0 m/s dengan percepatan sebesar  $9.81 \text{ m/s}^2$



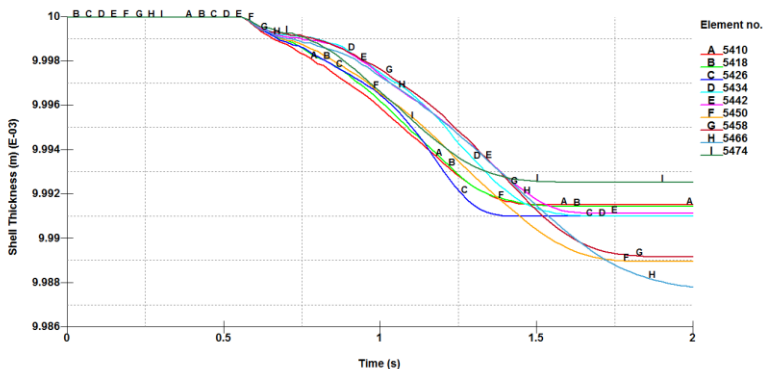
**Gambar 4.9** Geometri *Gritcone* dengan Radius Bawah  $r = 0.265$  m



**Gambar 4.10** Distribusi Ketebalan pada Dinding *Gritcone* dengan Radius Bawah  $r = 0.265$  m



Gambar 4.10 menunjukkan distribusi ketebalan dinding *gritcone* setelah disimulasikan. Didapat area pada dinding *gritcone* yang memiliki ketebalan paling rendah dibandingkan dengan area lainnya yaitu sebesar 0.00998769 m. Area yang memiliki ketebalan paling rendah menunjukkan tingkat keausan yang paling tinggi dan adanya potensi terbentuk *initial crack* pada area tersebut.



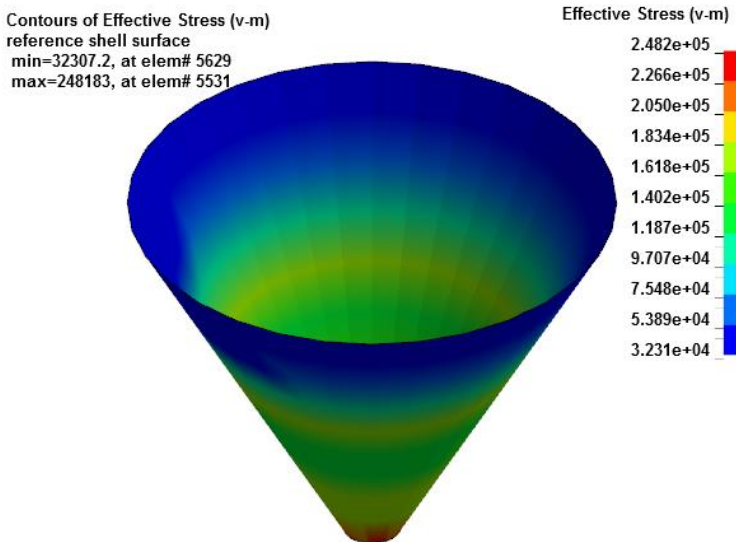
**Gambar 4.11** Grafik *time vs shell thickness Gritcone case 3*

Gambar 4.11 menunjukkan grafik *time vs shell thickness*. Dari gambar 4.11 dapat dilihat penurunan ketebalan dinding *gritcone* mulai terjadi pada saat  $t = \pm 0.6$  s. Penurunan ketebalan terjadi hingga  $t = \pm 1.6$  s pada dinding *gritcone*. Dinding *gritcone* yang memiliki ketebalan paling rendah berada pada element 5466 atau pada ketinggian 0.5 – 0.8 m dari dasar *gritcone*.

Distribusi tegangan yang terjadi pada dinding *gritcone* digambarkan pada gambar 4.12. Tegangan yang terjadi adalah tegangan Von Mises dengan komponen tegangan pada sumbu x, y dan z. Tegangan yang terjadi adalah tegangan yang disebabkan oleh pembebanan berupa partikel yang menumbuk dinding *gritcone*. Bagian dinding *gritcone* yang dikenai tegangan lebih tinggi dibandingkan bagian lainnya mengalami kerusakan sebanding dengan besarnya tegangan yang terjadi pada permukaan tersebut. Hal ini menunjukkan semakin tinggi tegangan yang



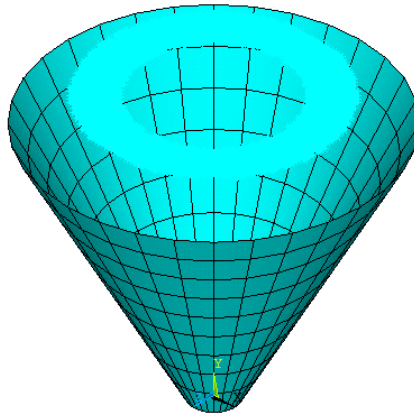
disebabkan tumbukan partikel dengan dinding *gritcone* semakin tinggi pengurangan ketebalan yang terjadi pada dinding *gritcone*.



**Gambar 4.12** Distribusi tegangan Von Mises pada Dinding *Gritcone* dengan Radius Bawah  $r = 0.265$  m

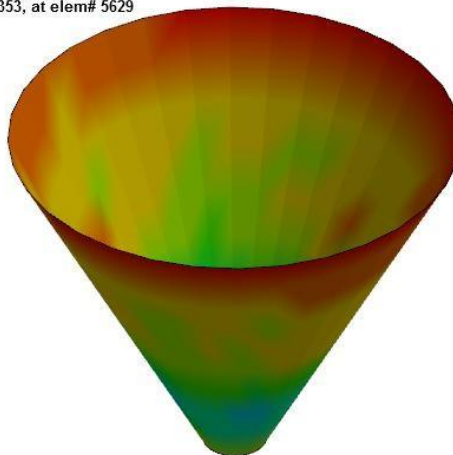
#### 4.1.4 Pengaruh Geometri *Gritcone* dengan $r = 0.315$ m

Geometri *Gritcone* yang disimulasikan terdapat pada gambar 4.13 dimana *gritcone* mempunyai radius bawah sebesar 0.315 m ketebalan *gritcone* sebesar 0.01 m. Geometri ini disimulasikan dengan mengabrasikan partikel batu bara dengan massa  $4.36 \times 10^{-10}$  kg. partikel tersebut bergerak dari kecepatan awal 0 m/s dengan percepatan sebesar  $9.81 \text{ m/s}^2$



**Gambar 4.13** Geometri *Gritcone* dengan Radius Bawah  $r = 0.315$  m

Contours of Shell Thickness  
min=0.00999104, at elem# 5539  
max=0.00999353, at elem# 5629



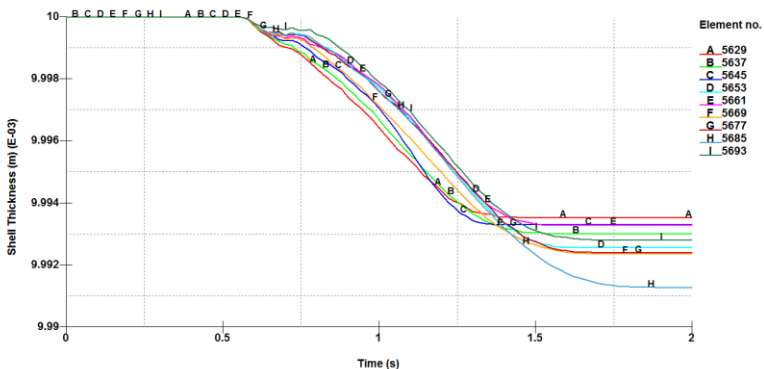
Shell Thickness



**Gambar 4.14** Distribusi Ketebalan pada Dinding *Gritcone* dengan Radius Bawah  $r = 0.315$  m.



Gambar 4.14 menunjukkan distribusi ketebalan dinding *gritcone* setelah disimulasikan. Didapat area pada dinding *gritcone* yang memiliki ketebalan paling rendah dibandingkan dengan area lainnya yaitu sebesar 0.00999104 m. Area yang memiliki ketebalan paling rendah menunjukkan tingkat keausan yang paling tinggi dan adanya potensi terbentuk *initial crack* pada area tersebut.



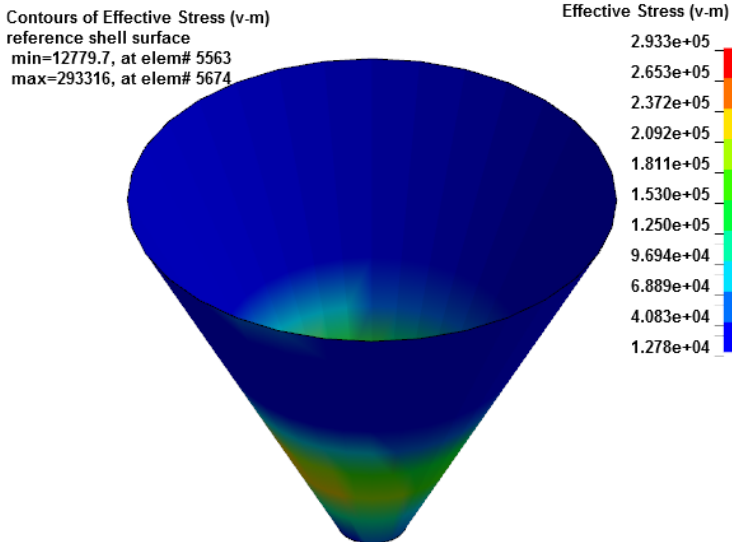
**Gambar 4.15** Grafik *time vs shell thickness gritcone case 4*

Gambar 4.15 menunjukkan grafik *time vs shell thickness*. Dari gambar 4.15 dapat dilihat penurunan ketebalan dinding *gritcone* mulai terjadi pada saat  $t = \pm 0.6$  s. Penurunan ketebalan terjadi hingga  $t = \pm 1.6$  s pada dinding *gritcone*. Dinding *gritcone* yang memiliki ketebalan paling rendah berada pada element 5685 atau pada ketinggian 0.5 – 0.8 m dari dasar *gritcone*.

Distribusi tegangan yang terjadi pada dinding *gritcone* digambarkan pada gambar 4.16. Tegangan yang terjadi adalah tegangan Von Mises dengan komponen tegangan pada sumbu x, y dan z. Tegangan yang terjadi adalah tegangan yang disebabkan oleh pembebanan berupa partikel yang menumbuk dinding *gritcone*. Bagian dinding *gritcone* yang dikenai tegangan lebih tinggi dibandingkan bagian lainnya mengalami kerusakan sebanding dengan besarnya tegangan yang terjadi pada permukaan tersebut. Hal ini menunjukkan semakin tinggi tegangan yang



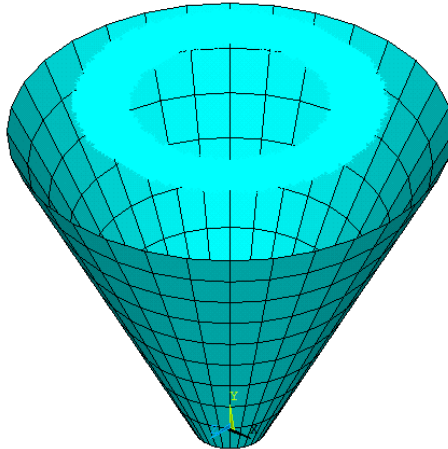
disebabkan tumbukan partikel dengan dinding *gritcone* semakin tinggi pengurangan ketebalan yang terjadi pada dinding *gritcone*.



**Gambar 4.16** Distribusi tegangan Von Mises pada Dinding *Gritcone* dengan Radius Bawah  $r = 0.315$  m

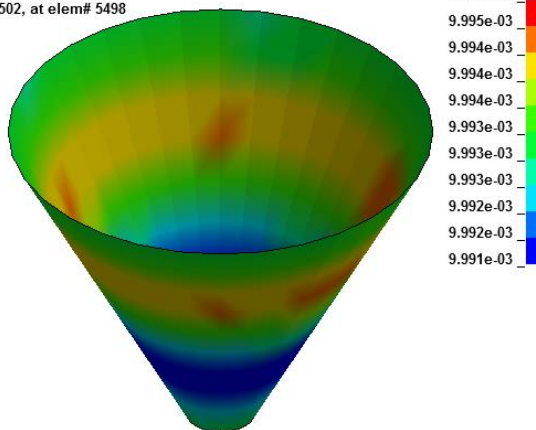
#### 4.1.5 Pengaruh Geometri *Gritcone* dengan $r = 0.365$ m

Geometri *Gritcone* yang disimulasikan terdapat pada gambar 4.17 dimana *gritcone* mempunyai radius bawah sebesar 0.365 m ketebalan *gritcone* sebesar 0.01 m. Geometri ini disimulasikan dengan mengabrasikan partikel batu bara dengan massa  $4.36 \times 10^{-10}$  kg. partikel tersebut bergerak dari kecepatan awal 0 m/s dengan percepatan sebesar  $9.81 \text{ m/s}^2$



**Gambar 4.17** Geometri *Gritcone* dengan Radius Bawah  $r = 0.365$  m

Contours of Shell Thickness  
min=0.00999149, at elem# 5603  
max=0.00999502, at elem# 5498

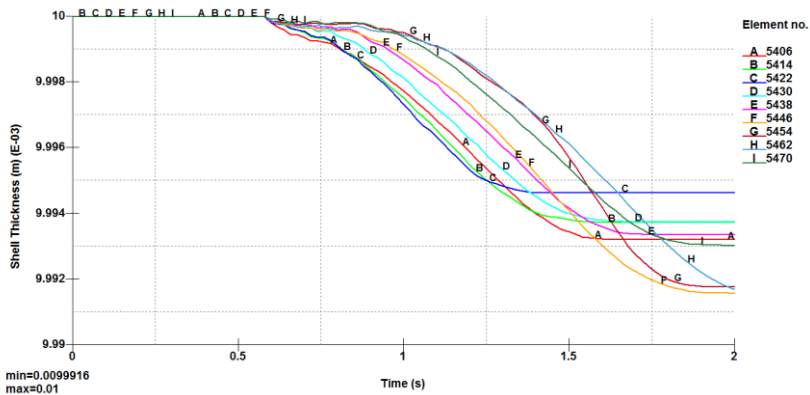


**Gambar 4.18** Distribusi Ketebalan pada Dinding *Gritcone* dengan Radius Bawah  $r = 0.365$  m





Gambar 4.18 menunjukkan distribusi ketebalan dinding *gritcone* setelah disimulasikan. Didapat area pada dinding *gritcone* yang memiliki ketebalan paling rendah dibandingkan dengan area lainnya yaitu sebesar 0.00999149 m. Area yang memiliki ketebalan paling rendah menunjukkan tingkat keausan yang paling tinggi dan adanya potensi terbentuk *initial crack* pada area tersebut.



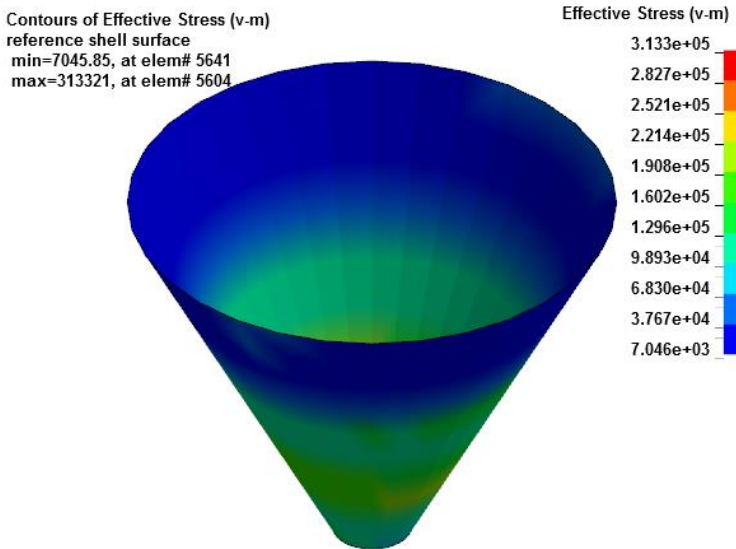
**Gambar 4.19** Grafik *time vs shell thickness gritcone case 5*

Gambar 4.19 menunjukkan grafik *time vs shell thickness*. Dari gambar 4.19 dapat dilihat penurunan ketebalan dinding *gritcone* mulai terjadi pada saat  $t = \pm 0.6$  s. Penurunan ketebalan terjadi hingga  $t = \pm 1.7$  s pada dinding *gritcone*. Dinding *gritcone* yang memiliki ketebalan paling rendah berada pada element 5447, 5455, dan 5463 atau pada ketinggian 0.5 – 1.6 m dari dasar *gritcone*.

Distribusi tegangan yang terjadi pada dinding *gritcone* digambarkan pada gambar 4.20. Tegangan yang terjadi adalah tegangan Von Mises dengan komponen tegangan pada sumbu x, y dan z. Tegangan yang terjadi adalah tegangan yang disebabkan oleh pembebanan berupa partikel yang menumbuk dinding *gritcone*. Bagian dinding *gritcone* yang dikenai tegangan lebih tinggi dibandingkan bagian lainnya mengalami kerusakan



sebanding dengan besarnya tegangan yang terjadi pada permukaan tersebut. Hal ini menunjukkan semakin tinggi tegangan yang disebabkan tumbukan partikel dengan dinding *gritcone* semakin tinggi pengurangan ketebalan yang terjadi pada dinding *gritcone*.



**Gambar 4.20** Distribusi tegangan Von Mises pada Dinding *Gritcone* dengan Radius Bawah  $r = 0.365$  m

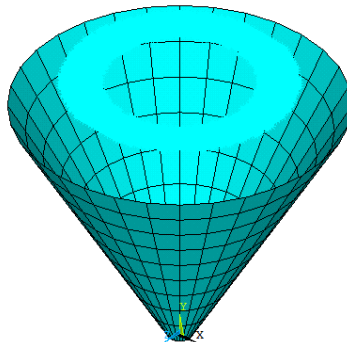
#### 4.2 Gritcone dengan ketebalan 0.02 m

Pada bagian ini, dibahas pengaruh ketebalan *gritcone* terhadap pola patahan *gritcone* yang diinisiasi oleh keausan pada dinding *gritcone*. Patahan akan mulai terbentuk dari dinding *gritcone* yang mengalami tingkat keausan tertinggi ditandai dengan ketebalan dinding yang paling minimum. Agar didapatkan hasil yang akurat maka simulasi dilakukan dengan lima variable jari-jari yaitu  $r = 0.165$  m,  $r = 0.215$  m,  $r = 0.265$  m,  $r = 0.315$  m, dan  $r = 0.365$  m.

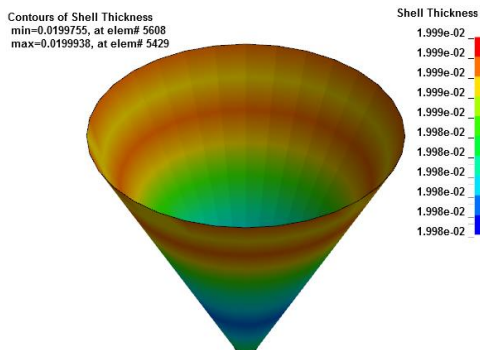


#### 4.2.1 Pengaruh Geometri *Gritcone* dengan $r = 0.165$ m

Geometri *Gritcone* yang disimulasikan terdapat pada gambar 4.21 dimana *gritcone* mempunyai radius bawah sebesar 0.165 m. Geometri ini disimulasikan dengan mengabrasikan partikel batu bara dengan massa  $4.36 \times 10^{-10}$  kg. partikel tersebut bergerak dari kecepatan awal 0 m/s dengan percepatan sebesar  $9.81 \text{ m/s}^2$



**Gambar 4.21** Geometri *gritcone* dengan radius bawah  $r = 0.165$  m

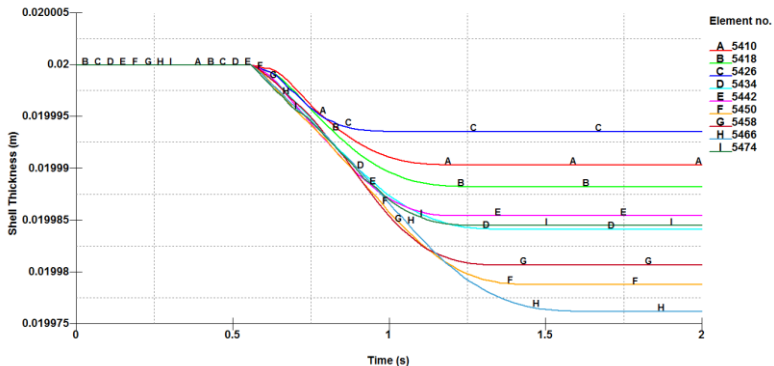


**Gambar 4.22** Distribusi ketebalan pada dinding *Gritcone* dengan radius bawah  $r = 0.165$  m

Gambar 4.22 menunjukkan distribusi ketebalan dinding *gritcone* setelah disimulasikan. Didapat area pada dinding *gritcone* yang memiliki ketebalan paling rendah dibandingkan dengan area



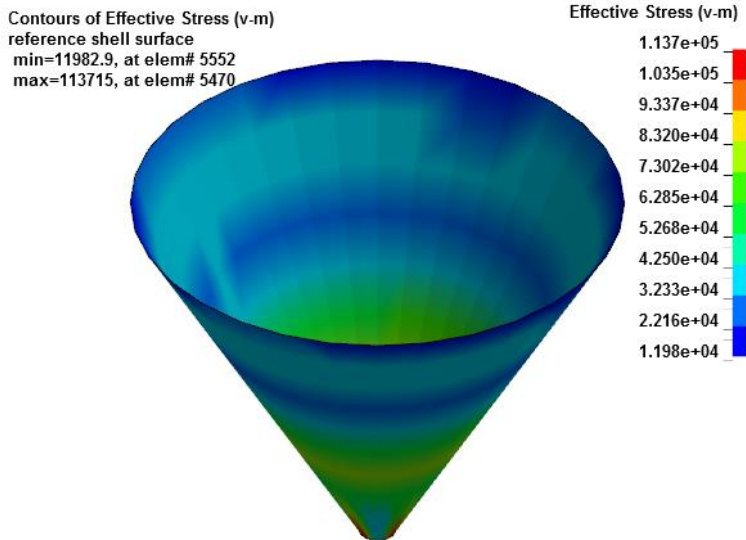
lainnya yaitu sebesar 0.0199755 m. Area yang memiliki ketebalan paling rendah menunjukkan tingkat keausan yang paling tinggi dan adanya potensi terbentuk *initial crack* pada area tersebut.



**Gambar 4.23** Grafik *time vs shell thickness Gritcone case 6*

Gambar 4.23 menunjukkan grafik *time vs shell thickness*. Dari gambar 4.23 dapat dilihat penurunan ketebalan dinding *gritcone* mulai terjadi pada saat  $t = \pm 0.6$  s. Penurunan ketebalan terjadi hingga  $t = \pm 1.6$  s pada dinding *gritcone*. Dinding *gritcone* yang memiliki ketebalan paling rendah berada pada element 5466 atau pada ketinggian 0.5 – 0.8 m dari dasar *gritcone*.

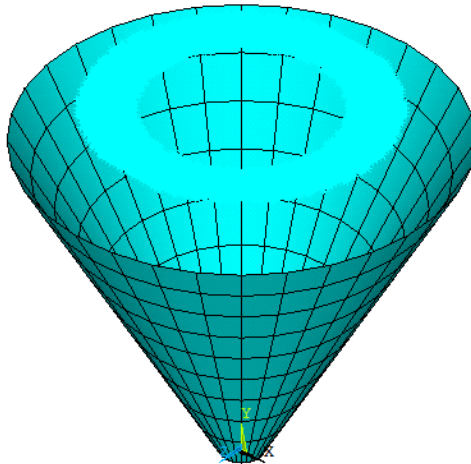
Distribusi tegangan yang terjadi pada dinding *gritcone* digambarkan pada gambar 4.24. Tegangan yang terjadi adalah tegangan Von Mises dengan komponen tegangan pada sumbu x, y dan z. Tegangan yang terjadi adalah tegangan yang disebabkan oleh pembebanan berupa partikel yang menumbuk dinding *gritcone*. Bagian dinding *gritcone* yang dikenai tegangan lebih tinggi dibandingkan bagian lainnya mengalami kerusakan sebanding dengan besarnya tegangan yang terjadi pada permukaan tersebut. Hal ini menunjukkan semakin tinggi tegangan yang disebabkan tumbukan partikel dengan dinding *gritcone* semakin tinggi pengurangan ketebalan yang terjadi pada dinding *gritcone*.



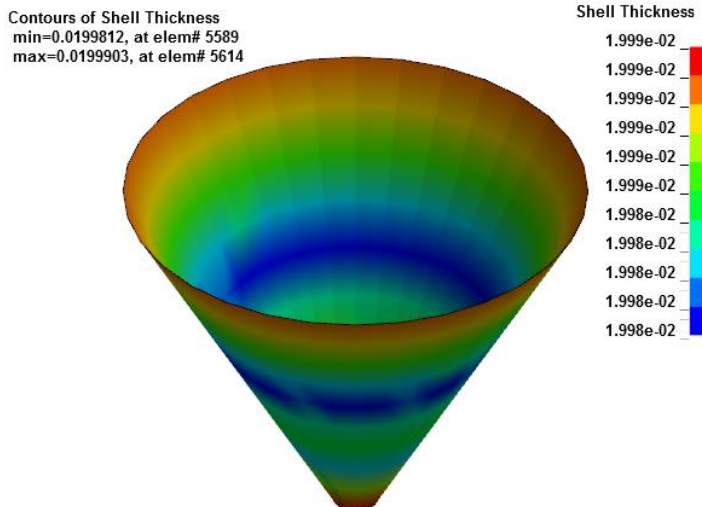
**Gambar 4.24** Distribusi tegangan Von Mises pada Dinding *Gritcone* dengan Radius Bawah  $r = 0.165$  m

#### 4.2.2 Pengaruh Geometri *Gritcone* dengan $r = 0.215$ m

Geometri *Gritcone* yang disimulasikan terdapat pada gambar 4.25 dimana *gritcone* mempunyai radius bawah sebesar 0.215 m ketebalan *gritcone* sebesar 0.02 m. Geometri ini disimulasikan dengan mengabrasikan partikel batu bara dengan massa  $4.36 \times 10^{-10}$  kg. partikel tersebut bergerak dari kecepatan awal 0 m/s dengan percepatan sebesar  $9.81 \text{ m/s}^2$



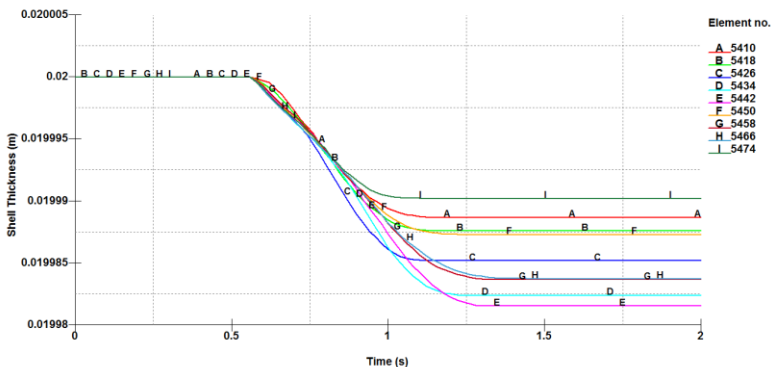
**Gambar 4.25** Geometri *Gritcone* dengan Radius Bawah  $r = 0.215$  m



**Gambar 4.26** Distribusi Ketebalan pada Dinding *Gritcone* dengan Radius Bawah  $r = 0.215$  m



Gambar 4.26 menunjukkan distribusi ketebalan dinding *gritcone* setelah disimulasikan. Didapat area pada dinding *gritcone* yang memiliki ketebalan paling rendah dibandingkan dengan area lainnya yaitu sebesar 0.0199812 m. Area yang memiliki ketebalan paling rendah menunjukkan tingkat keausan yang paling tinggi dan adanya potensi terbentuk *initial crack* pada area tersebut.



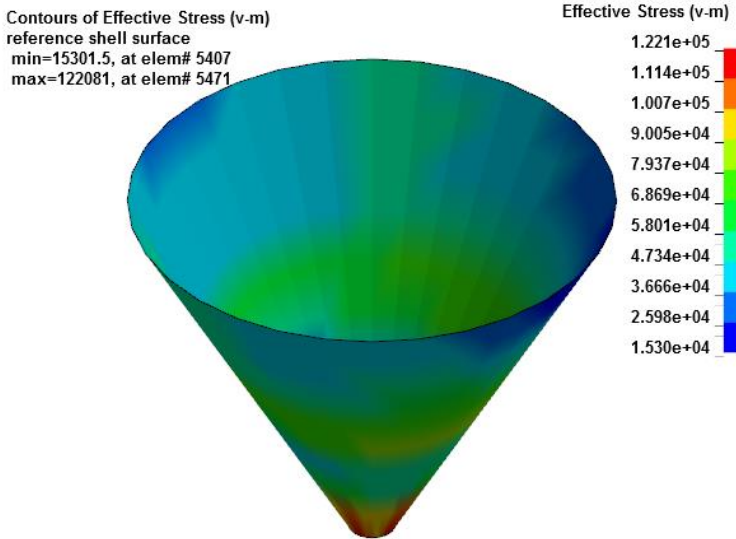
**Gambar 4.27** Grafik *time vs shell thickness Gritcone case 7*

Gambar 4.27 menunjukkan grafik *time vs shell thickness*. Dari gambar 4.21 dapat dilihat penurunan ketebalan dinding *gritcone* mulai terjadi pada saat  $t = \pm 0.6$  s. Penurunan ketebalan terjadi hingga  $t = \pm 1.7$  s pada dinding *gritcone*. Dinding *gritcone* yang memiliki ketebalan paling rendah berada pada element 5442 atau pada ketinggian 1.7 – 2.1 m dari dasar *gritcone*.

Distribusi tegangan yang terjadi pada dinding *gritcone* digambarkan pada gambar 4.28. Tegangan yang terjadi adalah tegangan Von Mises dengan komponen tegangan pada sumbu x, y dan z. Tegangan yang terjadi adalah tegangan yang disebabkan oleh pembebanan berupa partikel yang menumbuk dinding *gritcone*. Bagian dinding *gritcone* yang dikenai tegangan lebih tinggi dibandingkan bagian lainnya mengalami kerusakan sebanding dengan besarnya tegangan yang terjadi pada permukaan



tersebut. Hal ini menunjukkan semakin tinggi tegangan yang disebabkan tumbukan partikel dengan dinding *gritcone* semakin tinggi pengurangan ketebalan yang terjadi pada dinding *gritcone*.

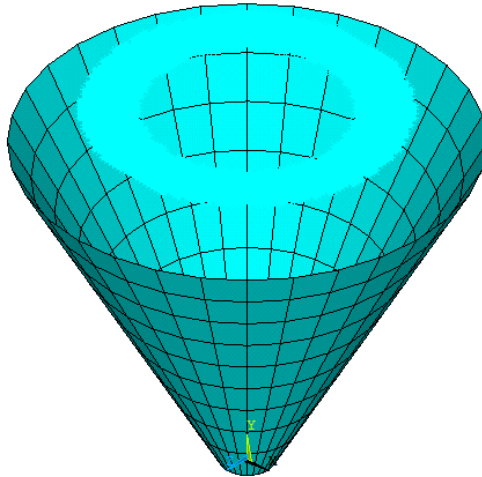


**Gambar 4.28** Distribusi tegangan Von Mises pada Dinding *Gritcone* dengan Radius Bawah  $r = 0.215$  m

#### 4.2.3 Pengaruh Geometri *Gritcone* dengan $r = 0.265$ m

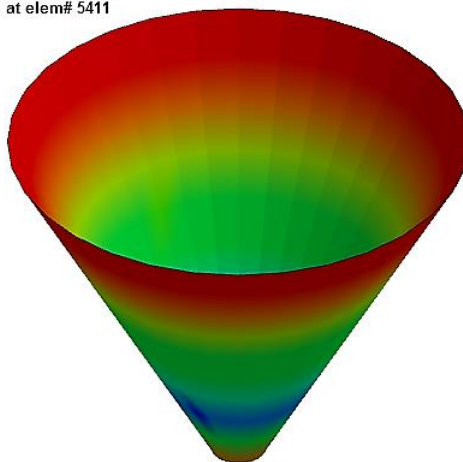
Geometri *Gritcone* yang disimulasikan terdapat pada gambar 4.29 dimana *gritcone* mempunyai radius bawah sebesar 0.265 m ketebalan *gritcone* sebesar 0.02 m. Geometri ini disimulasikan dengan mengabrasikan partikel batu bara dengan massa  $4.36 \times 10^{-10}$  kg. partikel tersebut bergerak dari kecepatan awal 0 m/s dengan percepatan sebesar  $9.81 \text{ m/s}^2$



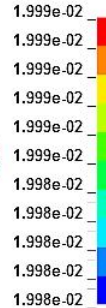


**Gambar 4.29** Geometri *Gritcone* dengan Radius Bawah  $r = 0.265$  m

Contours of Shell Thickness  
min=0.019981, at elem# 5683  
max=0.01999, at elem# 5411



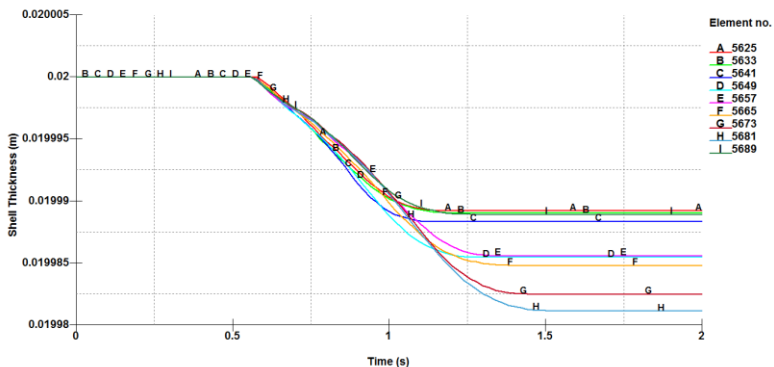
Shell Thickness



**Gambar 4.30** Distribusi Ketebalan pada Dinding *Gritcone* dengan Radius Bawah  $r = 0.265$  m



Gambar 4.30 menunjukkan distribusi ketebalan dinding *gritcone* setelah disimulasikan. Didapat area pada dinding *gritcone* yang memiliki ketebalan paling rendah dibandingkan dengan area lainnya yaitu sebesar 0.019981 m. Area yang memiliki ketebalan paling rendah menunjukkan tingkat keausan yang paling tinggi dan adanya potensi terbentuk *initial crack* pada area tersebut.



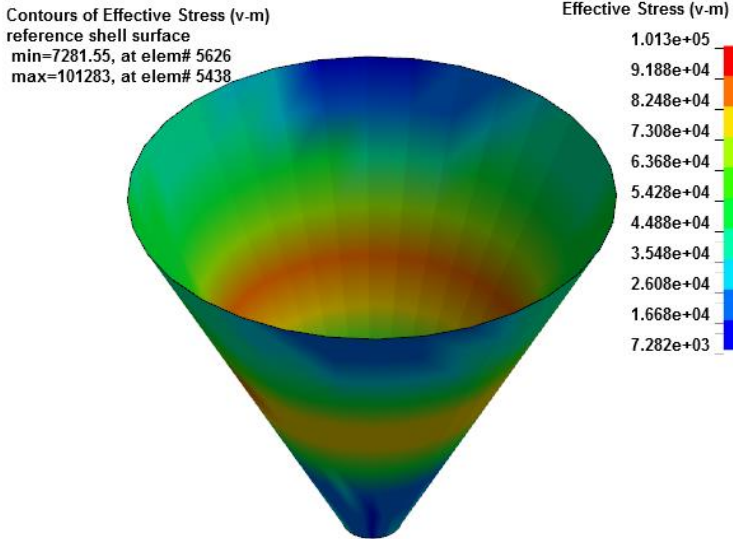
**Gambar 4.31** Grafik *time vs shell thickness Gritcone case 8*

Gambar 4.31 menunjukkan grafik *time vs shell thickness*. Dari gambar 4.31 dapat dilihat penurunan ketebalan dinding *gritcone* mulai terjadi pada saat  $t = \pm 0.6$  s. Penurunan ketebalan terjadi hingga  $t = \pm 1.7$  s pada dinding *gritcone*. Dinding *gritcone* yang memiliki ketebalan paling rendah berada pada element 5681 atau pada ketinggian 0.5 – 0.8 m dari dasar *gritcone*.

Distribusi tegangan yang terjadi pada dinding *gritcone* digambarkan pada gambar 4.28. Tegangan yang terjadi adalah tegangan Von Mises dengan komponen tegangan pada sumbu x, y dan z. Tegangan yang terjadi adalah tegangan yang disebabkan oleh pembebanan berupa partikel yang menumbuk dinding *gritcone*. Bagian dinding *gritcone* yang dikenai tegangan lebih tinggi dibandingkan bagian lainnya mengalami kerusakan sebanding dengan besarnya tegangan yang terjadi pada permukaan



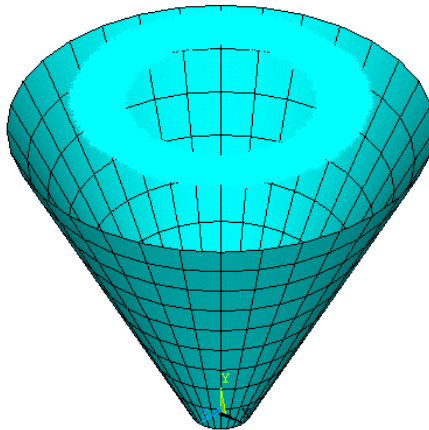
tersebut. Hal ini menunjukkan semakin tinggi tegangan yang disebabkan tumbukan partikel dengan dinding *gritcone* semakin tinggi pengurangan ketebalan yang terjadi pada dinding *gritcone*.



**Gambar 4.32** Distribusi tegangan Von Mises pada Dinding *Gritcone* dengan Radius Bawah  $r = 0.265$  m

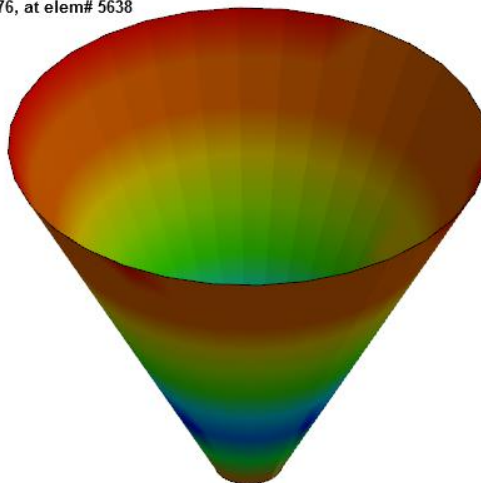
#### 4.2.4 Pengaruh Geometri *Gritcone* dengan $r = 0.315$ m

Geometri *Gritcone* yang disimulasikan terdapat pada gambar 4.33 dimana *gritcone* mempunyai radius bawah sebesar 0.315 m ketebalan *gritcone* sebesar 0.02 m. Geometri ini disimulasikan dengan mengabrasikan partikel batu bara dengan massa  $4.36 \times 10^{-10}$  kg. partikel tersebut bergerak dari kecepatan awal 0 m/s dengan percepatan sebesar  $9.81 \text{ m/s}^2$

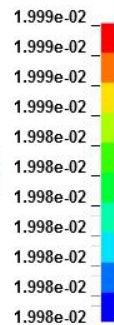


**Gambar 4.33** Geometri *Gritcone* dengan Radius Bawah  $r = 0.315$  m

Contours of Shell Thickness  
min=0.0199791, at elem# 5680  
max=0.0199876, at elem# 5638



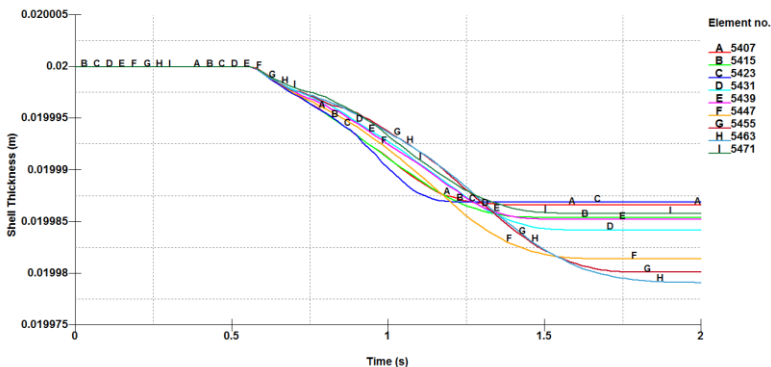
Shell Thickness



**Gambar 4.34** Distribusi Ketebalan pada Dinding *Gritcone* dengan Radius Bawah  $r = 0.315$  m



Gambar 4.34 menunjukkan distribusi ketebalan dinding *gritcone* setelah disimulasikan. Didapat area pada dinding *gritcone* yang memiliki ketebalan paling rendah dibandingkan dengan area lainnya yaitu sebesar 0.0199791 m. Area yang memiliki ketebalan paling rendah menunjukkan tingkat keausan yang paling tinggi dan adanya potensi terbentuk *initial crack* pada area tersebut.



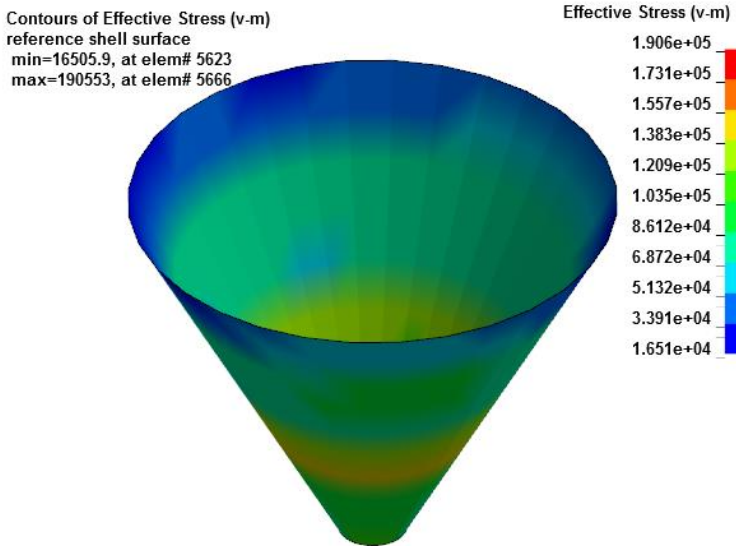
**Gambar 4.35** Grafik *time vs shell thickness gritcone case 9*

Gambar 4.35 menunjukkan grafik *time vs shell thickness*. Dari gambar 4.35 dapat dilihat penurunan ketebalan dinding *gritcone* mulai terjadi pada saat  $t = \pm 0.6$  s. Penurunan ketebalan terjadi hingga  $t = \pm 1.7$  s pada dinding *gritcone*. Dinding *gritcone* yang memiliki ketebalan paling rendah berada pada element 5463 atau pada ketinggian 0.5 – 0.8 m dari dasar *gritcone*.

Distribusi tegangan yang terjadi pada dinding *gritcone* digambarkan pada gambar 4.28. Tegangan yang terjadi adalah tegangan Von Mises dengan komponen tegangan pada sumbu x, y dan z. Tegangan yang terjadi adalah tegangan yang disebabkan oleh pembebanan berupa partikel yang menumbuk dinding *gritcone*. Bagian dinding *gritcone* yang dikenai tegangan lebih tinggi dibandingkan bagian lainnya mengalami kerusakan sebanding dengan besarnya tegangan yang terjadi pada permukaan



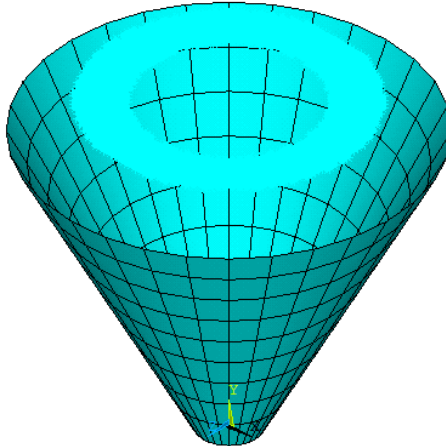
tersebut. Hal ini menunjukkan semakin tinggi tegangan yang disebabkan tumbukan partikel dengan dinding *gritcone* semakin tinggi pengurangan ketebalan yang terjadi pada dinding *gritcone*.



**Gambar 4.36** Distribusi tegangan Von Mises pada Dinding *Gritcone* dengan Radius Bawah  $r = 0.315$  m

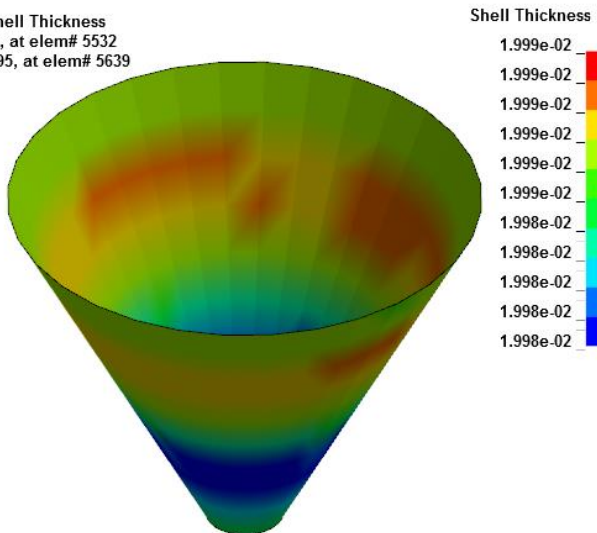
#### 4.2.5 Pengaruh Geometri *Gritcone* dengan $r = 0.365$ m

Geometri *Gritcone* yang disimulasikan terdapat pada gambar 4.37 dimana *gritcone* mempunyai radius bawah sebesar 0.365 m ketebalan *gritcone* sebesar 0.02 m. Geometri ini disimulasikan dengan mengabrasikan partikel batu bara dengan massa  $4.36 \times 10^{-10}$  kg. partikel tersebut bergerak dari kecepatan awal 0 m/s dengan percepatan sebesar  $9.81 \text{ m/s}^2$



**Gambar 4.37** Geometri *Gritcone* dengan Radius Bawah  $r = 0.365$  m

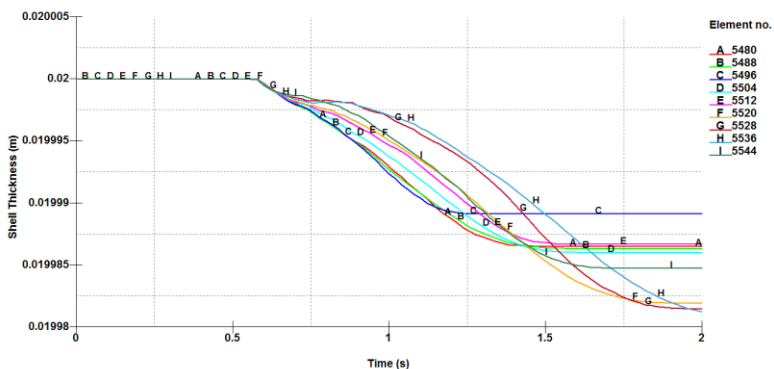
Contours of Shell Thickness  
min=0.019981, at elem# 5532  
max=0.0199895, at elem# 5639



**Gambar 4.38** Distribusi Ketebalan pada Dinding *Gritcone* dengan Radius Bawah  $r = 0.365$  m



Gambar 4.38 menunjukkan distribusi ketebalan dinding *gritcone* setelah disimulasikan. Didapat area pada dinding *gritcone* yang memiliki ketebalan paling rendah dibandingkan dengan area lainnya yaitu sebesar 0.019981 m. Area yang memiliki ketebalan paling rendah menunjukkan tingkat keausan yang paling tinggi dan adanya potensi terbentuk *initial crack* pada area tersebut



**Gambar 4.39** Grafik *time vs shell thickness Gritcone case 10*

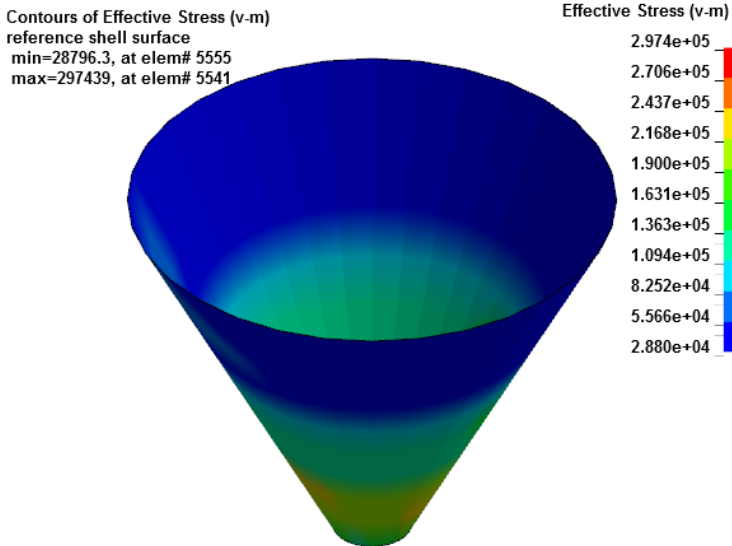
.Gambar 4.39 menunjukkan grafik *time vs shell thickness*. Dari gambar 4.39 dapat dilihat penurunan ketebalan dinding *gritcone* mulai terjadi pada saat  $t = \pm 0.6$  s. Penurunan ketebalan terjadi hingga  $t = \pm 1.7$  s pada dinding *gritcone*. Dinding *gritcone* yang memiliki ketebalan paling rendah berada pada element 5536 atau pada ketinggian 0.5 – 0.8 m dari dasar *gritcone*.

Distribusi tegangan yang terjadi pada dinding *gritcone* digambarkan pada gambar 4.40. Tegangan yang terjadi adalah tegangan Von Mises dengan komponen tegangan pada sumbu x, y dan z. Tegangan yang terjadi adalah tegangan yang disebabkan oleh pembebanan berupa partikel yang menumbuk dinding *gritcone*. Bagian dinding *gritcone* yang dikenai tegangan lebih tinggi dibandingkan bagian lainnya mengalami kerusakan sebanding dengan besarnya tegangan yang terjadi pada permukaan





tersebut. Hal ini menunjukkan semakin tinggi tegangan yang disebabkan tumbukan partikel dengan dinding *gritcone* semakin tinggi pengurangan ketebalan yang terjadi pada dinding *gritcone*.



**Gambar 4.40** Distribusi tegangan Von Mises pada Dinding *Gritcone* dengan Radius Bawah  $r = 0.365$  m

Simulasi dilakukan dengan melakukan pembebanan berupa akselerasi tanpa rotasi pada node. Akselerasi tersebut akan membuat partikel mengalami pertambahan kecepatan hingga akhirnya bersentuhan dengan dinding *gritcone* dan menyebabkan abrasi.

Dari hasil simulasi ditemukan adanya area yang memiliki ketebalan dinding *gritcone* yang lebih rendah dibandingkan bagian lainnya. Bagian yang mengalami aus mengalami *crack* pada permukaannya karena proses abrasi dari partikel (Gaulco, 2016)

## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Dari hasil dan analisa data yang dilakukan dapat diambil kesimpulan :

1. Radius bawah gritcone berpengaruh terhadap distribusi ketebalan dinding gritcone. Pada simulasi dengan ketebalan dinding gritcone 0.01 m, ketebalan minimal dinding gritcone terdapat pada gritcone dengan radius bawah 0.165 m, dengan ketebalan minimal 0.00998577 m dan ketebalan maksimal 0.0099946 m, dengan pengurangan ketebalan sebesar  $1.423 \times 10^{-5}$  m. Ketebalan maksimal dinding gritcone terdapat pada gritcone dengan radius bawah 0.365 m, dengan ketebalan minimal 0.00999149 m dan ketebalan maksimal 0.00999502 m, dengan pengurangan ketebalan sebesar  $8.51 \times 10^{-6}$  m.
2. Pada simulasi dengan ketebalan dinding gritcone 0.02 m, ketebalan minimal dinding gritcone terdapat pada gritcone dengan radius 0.165 m, dengan ketebalan minimal 0.0199755 m dan ketebalan maksimal 0.0199938 m, dengan pengurangan ketebalan sebesar  $2.45 \times 10^{-5}$  m. Ketebalan maksimal dinding gritcone terdapat pada gritcone dengan radius bawah 0.365 m, dengan ketebalan minimal 0.019981 m dan ketebalan maksimal 0.0199895 m, dengan pengurangan ketebalan sebesar  $1.9 \times 10^{-5}$  m.
3. Desain gritcone alternatif yang optimal adalah gritcone yang mengalami pengurangan ketebalan dinding gritcone paling kecil, yaitu dengan radius bawah 0.365 m dengan ketebalan 0.01 m dan dengan radius bawah 0.365 m dengan ketebalan 0.02 m.



## **5.2     Saran**

1. Dilakukan penelitian lebih lanjut dengan mengaplikasikan rotasi pada node partikel batubara
2. Dilakukan penelitian lebih lanjut dengan variasi kecepatan awal dan percepatan.

## DAFTAR PUSTAKA

- Altun, Deniz. 2016. **Operational Parameters Affecting The Vertical Roller Mill Performance**. Turki : Hacettepe University
- Arabnejad. 2014. **A Guideline to Calculate Erosional Velocity due to Liquid Droplets for Oil and Gas Industry, in : proceeding of the SPE Annual Technical Conference and Exhibition**. Belanda
- Arabnejad. 2015. **Development of Mechanistic Erosion Equation for Solid Particle**. Amerika Serikat : University of Tulsa
- Brook, C. R. & Choudhury, A., 2002. **Failure Analysis of Engineering Materials**. New York: McGraw Hills
- Chi, Ai dan Li Yuwei. 2013. **The Model for Calculating Elastic Modulus and Poisson's Ratio of Coal Body**. China : Northeast University
- Deutschman, Aaron D. 1975. **Machine Design : Theory and Practice**. Amerika Serikat : Collier-Macmillan, Ltd.
- Gaulco, Agustin. 2016. **Study of Abrasive Wear Resistance of Fe-based Nanostructured Hardfacing**. Argentina : National University of Lamos de Zamora
- Hallquist, John. 2006. **LS-DYNA Theory Manual**. Amerika Serikat : Livermore Software Technology Corporation
- Lipson, Charles. 1967. **Wear Consideration in Design**. Amerika Serikat : Prentice-Hall, Inc.
- Livermore Software Technology Corporation. **Differences between Implicit and Explicit**. 2011 <  
<http://www.dynasupport.com/faq/general/what-are-the-differences-between-implicit-and-explicit>>
- Naz, Muhammad Yasin. 2016. **Erodent Impact Angle and Velocity Effects on Surface Morphology of Mild Steel**. Malaysia : Universiti Teknologi Malaysia

- Ratia, V . 2015. **Behavior of Martensitic Steels in Abrasion and Impact Wear Testing Conditions**.Finlandia : Tampere University of Technology
- Rigaud, Emmanuel dan Alain Le Bot . 2013. **Influence of Incidence Angle on Wear Induced by Sliding Impacts**.Perancis : Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systemes
- Thyssenkrupp Steel Europe. 2014. **XAR® 400 Datasheet**. Germany
- Wills, Barry A. dan Tim Napier-munn. 2006. **Mineral Processing Technology**. UK : Butterworth-Heinemann

**LAMPIRAN**  
**Kriteria Kegagalan \*MAT\_ADD\_EROSION**

Card 1      1          2          3          4          5          6          7      8

Variable	MID	EXCL	MXPRES	MNEPS	EFFEPS	VOLEPS	NUMFIP	NCS
Type	A8	F	F	F	F	F	F	F
Default	None	None	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0

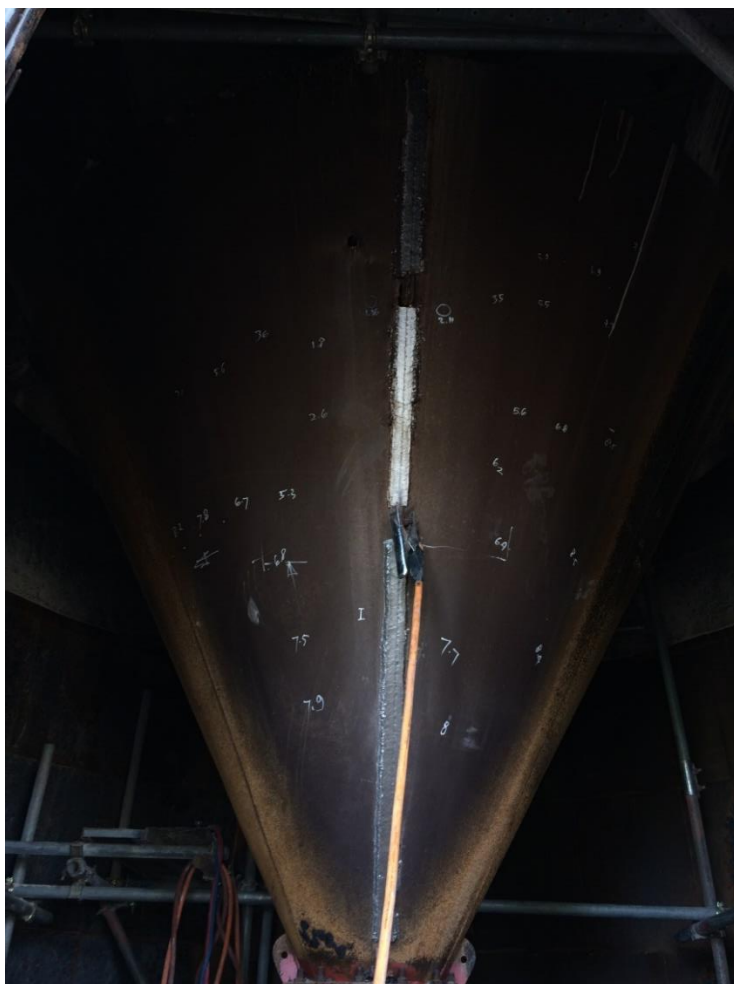
Card 2      1          2          3          4          5          6          7          8

Variable	MNPRES	SIGP1	SIGVM	MXEPS	EPSSH	SIGTH	IMPULSE	FAILTM
Type	F	F	F	F	F	F	F	F
Default	None	None	None	None	None	None	None	None

<b>Variabel</b>	<b>Deskripsi</b>
MID mengalami	Nomor Spesifik dari Material yang kegagalan
EXCL	Nomor pengecualian, yang diaplikasikan terhadap nilai yang ada di Card 2. Ketika ada beberapa konstantakegagalan diatur sesuai nomor pengecualian, konstanta yang berkaitan akan tidak dihitung
MXPRES	Tekanan maksimal ketika mengalami kegagalan, $P_{max}$
MNEPS	Regangan principal minimal ketika mengalami kegagalan, $\epsilon_{min}$
EFFEPS	Regangan efektif maksimal ketika mengalami kegagalan, $\epsilon_{eff} = \sqrt{2/3 e_{ij}^{dev} e_{ij}^{dev}}$
VOLEPS	Regangan volumetric ketika mengalami kegagalan, $\epsilon_{vol} = \epsilon_{11} + \epsilon_{22} + \epsilon_{33}$ . VOLEPS dapat bernilai negative atau positif, bergantung kepada keagalannya, apakah karena beban kompresi atau tarik.
NUMFIP	Jumlah poin elemen integrase yang terhapus ketika mengalami kegagalan.
MNPRES	Tekanan minimal ketika mengalami kegagalan, $P_{min}$
SIGP1	Tegangan principal ketika mengalami kegagalan, $\sigma_{max}$
SIGVM	Tegangan ekuivalen ketika mengalami kegagalan, $\sigma_{max}$
MXEPS	Regangan maksimal ketika mengalami kegagalan, $\epsilon_{max}$ . Regangan maksimal ketika mengalami kegagalan terbentuk dari fungsi

	laju regangan efektif dengan mengatur MXEPS menjadi negative bersesuaian dengan kurva pembebanan sesuai nomor material yang mengalami kegagalan.
EPSSH	Regangan geser ketika mengalami kegagalan, $\gamma_{max}$
SIGTH	Tegangan Threshold, $\sigma_0$
IMPULSE	Impuls tegangan ketika mengalami kegagalan, $K_f$
FAILTM	Waktu spesifik ketika material mengalami kegagalan. Ketika waktu tersebut terlewati maka material akan terhapus





**Gambar Lampiran.** Distribusi ketebalan pada gritcone  
(PT.Holcim Indonesia Tuban Plant)

## UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada semua pihak yang telah ikut berperan serta terhadap penulisan tugas akhir ini. Penulis mengucapkan terima kasih, terutama kepada:

1. Kedua orang tua dan kakak tercinta saya, Bapak Amrizal, Ibu Desi Helmita dan Defri Rizaldy S.Farm.,Apt.,M.Sc atas semua dukungan, motivasi dan do'a yang selalu dipanjatkan.
2. Dr. Agung Purniawan, S.T., M.Eng selaku Ketua Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI – ITS.
3. Bapak Mas Irfan P. Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D. selaku dosen pembimbing tugas akhir yang telah memberikan bekal yang sangat bermanfaat.
4. Bapak Ir. Rochman Rochiem, M.Sc. Selaku dosen pembimbing kedua dan dosen wali yang telah memberikan saran dan mendukung kelancaran tugas akhir penulis serta membimbing selama penulis menjadi mahasiswa..
5. Seluruh dosen dan karyawan Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS.
6. Bapak Essa Abubakar Wahid dan PT Holcim Indonesia Tuban plant yang memberikan kesempatan untuk melakukan penelitian.
7. Muhammad Arsyad P, Muhammad Yogie L, Rifqi Zufar S, Iman Satria, Caesario Isak, dan Kamil Ernas selaku *partner* mengerjakan tugas Akhir.
8. Teman-teman MT 14 dan para pihak yang selalu mendukung yang tidak bisa penulis tuliskan satu persatu.

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan Tugas Akhir ini masih terdapat kekurangan, Namun, penulis berharap bahwa laporan ini dapat bermanfaat bagi penulis sendiri dan pembaca.

Surabaya, Januari 2017

Penulis

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## BIODATA PENULIS



Penulis yang akrab dipanggil Dika ini bernama lengkap Andika Rizaldy. Penulis dilahirkan di Bekasi pada tanggal 16 Oktober 1994 silam . Penulis merupakan anak kedua dari 2 bersaudara dan telah menempuh pendidikan formal, yaitu SDN Setiadharma 1, SMPN 3 Tambun Selatan, dan SMAN 1 Tambun Selatan. Setelah itu, penulis melanjutkan studinya ke Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya pada tahun 2012 di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI ITS dengan nomor registrasi pokok 2712 100 083. Semasa kuliah, penulis aktif sebagai staff Steering Committee Kaderisasi HMMT FTI-ITS, Selain aktif di kampus, penulis juga menekuni olahraga di bidang billiard. Penulis mengambil tugas akhirnya di bidang analisa numerik dan modelling di laboratorium komputasi dan pemodelan material.

Email : andika.rizaldy@gmail.com